



jeudi 8 janvier 2009

PROJET DE FIN D'ETUDES  
Année universitaire 2008 – 2009

**Analyse des connaissances mises en œuvre  
dans l'aide à la décision en maintenance d'hélicoptères**

Éric VILLENEUVE

PROJET N° LG -- 2008

---

**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES**

---

ENTITÉ RESPONSABLE

**École des Mines d'Albi-Carnaux**

Campus Jarlard  
Route de Teillet  
81013 ALBI Cedex 09

ENTREPRISE D'ACCUEIL

**IXAIRCO**

12 rue du Général Sarrail  
82000 Montauban

## **REMERCIEMENTS.**

Je tiens tout d'abord à remercier M. Michel ALDANONDO, professeur à l'École des Mines d'Albi-Carmaux, et M. Laurent GENESTE, professeur à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, mes tuteurs pour ce projet de fin d'études, pour leur pédagogie, leur disponibilité et leur aide précieuse tout au long de mon stage.

Je souhaite également remercier M. Philippe THENAISIE, directeur général de la société IXAIRCO, pour m'avoir accueilli dans les locaux de son entreprise et pour les informations et la bonne humeur qu'il a apporté à nos divers entretiens.

Je remercie également le Centre Génie Industriel de l'École des Mines d'Albi-Carmaux pour m'avoir offert la structure d'encadrement et le matériel qui m'ont permis de travailler durant ce stage. En outre, j'adresse mes remerciements à tous les membres de ce laboratoire pour leur accueil lors de mes nombreuses visites. J'ajoute une mention spéciale à Élise VAREILLES et Cédric BELER pour leurs agréables relations de travail, leur disponibilité et leur soutien pendant toute la durée de ce stage.

De plus, je tiens à remercier les ingénieurs du Centre de Ressources et de Compétences « Information, Décision, Communication en Entreprise » du Laboratoire Génie de Production de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, et plus particulièrement Elisabeth DERETHE, pour leur aide sur le logiciel T-REX.

Pour finir, je remercie Michel ROUBIN, Pascal DUROT et Stéphanie BOUTINES, de la société IXAIRCO, ainsi que Christophe BENEULT, de la société SEMIA, pour m'avoir permis de m'intégrer rapidement et pour leur bonne humeur quotidienne.

## **ABSTRACT.**

This report deals with the study that I realized on the HELIMaintenance R&D project. I worked on behalf of the “Centre Génie Industriel de l'École des Mines d'Albi-Carmaux” during five months between September 2008 and January 2009. I was located in the company IXAIRCO, in charge of this project, in Montauban (France) in order to have an easy access to the information necessary for my work.

The HELIMaintenance goal is to optimize the helicopter maintenance by reducing the maintenance costs. The purpose of this project is the design of an Integrate Logistics System able to analyse critical parts data in flight and to pilot maintenance workshop activity in order to reduce helicopter inactivity. In the framework of this project, one of the work package (the sixth) aim to suggest aided-decision approaches and tools for helicopter maintenance in order to improve quality and performances of this process.

The main research axis belong to the domain of the knowledge management, the experience feedback, the constraints satisfaction problem and the different ways to associate this methods. Because of the project progress, my work aimed to identify some typical maintenance cases that we could assist with aided-decision tools in order to reach work package objectives.

In order to achieve my project, I began by making a survey of the activities already realized around the research axis. Then, we made the industrial partners aware of the aided-decision approaches and we modelled the helicopter maintenance process with the Business Process Modelling Notation (BPMN), which is a process modelling formalism. Finally, we suggested some conceivable aided-decision tools, which could be developed to continue this project.

## TABLE DES MATIERES.

<b>REMERCIEMENTS.</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT.</b>	<b>2</b>
<b>TABLE DES MATIERES.</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCTION.</b>	<b>6</b>
<b>CHAPITRE 1: PRÉSENTATION.</b>	<b>7</b>
<b>I. STRUCTURES D'ACCUEIL.</b>	<b>7</b>
I.1. L'ÉCOLE DES MINES D'ALBI – CARMAUX.	7
I.2. L'ENTREPRISE IXAIRCO.	8
<b>II. HELIMAINTENANCE.</b>	<b>8</b>
II.1. GENERALITES.	8
II.2. HELIMAINTENANCE R&D.	9
II.2.1 Généralités	9
II.2.2 Le lot n°6.	10
<b>III. LE PROJET.</b>	<b>11</b>
III.1. OBJECTIFS.	11
III.2. PLANNING.	11
<b>CHAPITRE 2: ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE.</b>	<b>13</b>
<b>I. GESTION DES CONNAISSANCES.</b>	<b>13</b>
I.1. GENERALITES	13
I.2. ORGANISATION DES CONNAISSANCES.	14
I.2.1 Données, Informations, Connaissances, Savoir-faire et Expérience.	14
I.2.2 Caractérisation des connaissances.	15
I.2.3 Dynamique des connaissances.	15
I.3. REPRESENTATION DES CONNAISSANCES.	16
I.3.1 Représentation des connaissances basée sur la logique.	16
I.3.2 Représentation des connaissances basée sur les « frames ».	16
I.4. LA GESTION INCREMENTALE DES CONNAISSANCES.	17
<b>II. LE RETOUR D'EXPERIENCE.</b>	<b>18</b>
II.1. GENERALITES.	18
II.2. TYPOLOGIE DES RETOURS D'EXPERIENCE.	18
II.2.1 Le retour d'expérience de crise :	18
II.2.2 Le retour d'expérience statistique :	19
II.2.3 Le retour d'expérience cognitif :	19
II.2.4 Conclusion	19
II.3. LE RAISONNEMENT A PARTIR DE CAS.	20
II.3.1 Généralités.	20
II.3.2 Le cycle du RàPC.	20
II.3.3 Représentation des cas.	22
<b>III. PROBLEMES DE SATISFACTION DE CONTRAINTES.</b>	<b>23</b>
III.1. GENERALITES.	23
III.2. LES VARIABLES.	24
III.2.1 Variables discrètes.	24

III.2.2	Variables continues.	25
III.3.	LES CONTRAINTES	25
III.3.1	Contraintes extensives.	25
III.3.2	Contraintes intensives.	25
III.3.3	Contraintes logiques.	25
III.3.4	Arité d'une contrainte.	26
III.4.	LES DIFFERENTS TYPES DE CSP.	26
III.4.1	Les CSP.	26
III.4.2	Les CSP dynamiques	26
III.5.	RESOLUTION ET FILTRAGE DES CSP.	27
III.5.1	Résolution des CSP.	27
III.5.2	Filtrage des CSP.	28
<b>IV.</b>	<b>LE COUPLAGE ENTRE RETOUR D'EXPERIENCE ET CSP.</b>	<b>29</b>
IV.1.	GENERALITES.	29
IV.2.	APPLICATIONS.	30
IV.2.1	COMPOSER.	30
IV.2.2	CADRE.	30
IV.2.3	IDIOM.	31
IV.2.4	JULIA.	31
IV.2.5	CHARADE.	32
IV.2.6	Test sur l'interopérabilité des protocoles réseaux.	32
IV.2.7	CBAR.	32
IV.2.8	Conception technique (engineering design).	33
<b>V.</b>	<b>BILAN DE L'ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.</b>	<b>33</b>
<b>CHAPITRE 3:</b>	<b>TRAVAUX REALISES.</b>	<b>34</b>
<b>I.</b>	<b>SENSIBILISATION AUX APPROCHES UTILISEES.</b>	<b>34</b>
I.1.	LES MODELES DE CONNAISSANCES A BASE DE CONTRAINTES.	34
I.1.1	Modèle utilisant des variables discrètes.	34
I.1.2	Modèle couplant les variables discrètes et continues.	36
I.2.	MODELE UTILISANT LE PROCESSUS DE RETOUR D'EXPERIENCE.	37
I.3.	PRESENTATION DU COUPLAGE.	38
<b>II.</b>	<b>MODELISATION DU PROCESSUS DE MAINTENANCE.</b>	<b>39</b>
II.1.	MODELISATION DU VOCABULAIRE DU DOMAINE.	39
II.2.	CHOIX DU FORMALISME DE MODELISATION.	40
II.3.	LE PROCESSUS DE MAINTENANCE D'HELICOPTERE.	40
II.3.1	Présentation.	40
II.3.2	Identification et positionnement des axes à développer.	41
<b>III.</b>	<b>DESCRIPTION DES AXES DE RECHERCHE POTENTIELS.</b>	<b>42</b>
III.1.	MODELISATION DU PROGRAMME RECOMMANDE D'ENTRETIEN.	42
III.1.1	Introduction.	42
III.1.2	Description de l'outil envisagé.	43
III.1.3	Mise en œuvre envisagée.	43
III.1.4	Intérêt industriel.	44
III.2.	OUTIL DE COMPTABILITE ANALYTIQUE.	44
III.2.1	Introduction.	44
III.2.2	Description de l'outil envisagé.	44
III.2.3	Mise en œuvre envisagée.	45
III.2.4	Intérêt industriel.	45
III.3.	MODELISATION DU RISQUE D'IMPREVU.	45
III.3.1	Introduction.	45
III.3.2	Description de l'outil envisagé.	46

III.3.3	Mise en œuvre envisagée.	46
III.3.4	Intérêt industriel.	47
III.4.	OUTIL D'AIDE A LA RESOLUTION DE PROBLEME.	47
III.4.1	Introduction.	47
III.4.2	Description de l'outil envisagé et de sa mise en œuvre.	47
III.4.3	Intérêt industriel.	48
III.5.	STRUCTURE GENERALE.	48
III.6.	INTERET ACADEMIQUE.	50
<b>CONCLUSION.</b>		<b>51</b>
<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS.</b>		<b>52</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.</b>		<b>52</b>
<b>ANNEXES.</b>		<b>58</b>

## INTRODUCTION.

---

Ce mémoire de fin d'études présente le travail que j'ai effectué sur le projet HELIMaintenance R&D pour le compte du Centre Génie Industriel de l'École des Mines d'Albi-Carmaux durant cinq mois entre septembre 2008 et janvier 2009. Pour être au plus près de l'information nécessaire à mon travail, j'ai été accueilli dans les locaux de l'entreprise IXAIRCO, porteuse de ce projet, à Montauban (82).

Le projet HELIMaintenance R&D a pour vocation l'optimisation de la maintenance des hélicoptères civils moyens et lourds en diminuant de 30% les coûts liés à cette maintenance. Il s'agit de construire un système logistique intégré allant du suivi en vol de données relatant les charges subies par les pièces critiques, au pilotage de l'activité des ateliers de maintenance, afin de réduire au strict minimum la durée d'immobilisation des hélicoptères.

Dans le cadre de ce projet, un des lots de travail (le lot n°6) vise à proposer des approches et des outils pour aider à la décision en maintenance d'hélicoptère, dans le but d'améliorer la qualité et les performances de ce processus. Les principaux axes de recherche évoqués pour répondre à cette problématique se situent dans les domaines de la gestion des connaissances, du retour d'expérience, des problèmes de satisfaction de contraintes et des différentes manières de coupler ces méthodes. Le projet en étant à ses débuts, mon travail avait pour but l'identification de premiers cas typiques de maintenance qu'il serait possible d'assister avec des outils d'aide à la décision afin de répondre aux objectifs du lot n°6.

Dans un premier temps, ce rapport présente mon projet de fin d'étude et son contexte. Cette partie décrit les structures qui m'ont accueilli et encadré durant ce projet, à savoir : l'EMAC et la société IXAIRCO, le projet HELIMaintenance dans son ensemble et plus particulièrement la partie R&D et le Lot n°6, et enfin, les objectifs et le planning de mon projet.

Dans un second temps, un chapitre présente l'état de l'art des activités déjà effectuées autour des axes de recherche évoqués précédemment à savoir : la gestion des connaissances, le retour d'expérience, les problèmes de satisfaction de contraintes et le couplage entre ces deux dernières techniques.

Pour finir, le dernier chapitre présente le travail que j'ai réalisé durant ce stage en commençant par une sensibilisation des industriels au domaine de l'aide à la décision puis en décrivant la modélisation du processus de maintenance des hélicoptères et pour finir, en exposant les axes de recherche envisagés pour la suite du projet.

## CHAPITRE 1: PRÉSENTATION.

---

### I. STRUCTURES D'ACCUEIL.

Lors de mon stage, j'étais sous la responsabilité administrative de l'École des Mines d'Albi-Carmaux. Cependant, la majorité de mon travail résidant dans la compréhension du processus de maintenance des hélicoptères, j'ai été détaché dans l'entreprise IXAIRCO pour faciliter l'échange d'informations. Cette partie présente donc ces deux entités.

#### I.1. L'ÉCOLE DES MINES D'ALBI – CARMAUX.

Créée en 1992, l'École des Mines d'Albi-Carmaux <sup>1</sup> (EMAC) est une école d'ingénieurs qui appartient au GEM <sup>2</sup> (Groupe des Écoles des Mines) qui regroupe les sept Écoles des Mines en France (Paris, Saint-Etienne, Alès, Douai, Nancy, Nantes et Albi). La principale particularité de ces écoles réside dans leur gestion par le Ministère de l'Industrie à la différence de la majorité des écoles d'ingénieurs qui sont sous la tutelle du Ministère de l'Education Nationale.

La recherche tient une place importante dans cette structure car près de 90% des enseignants sont également des chercheurs. Elle s'organise autour de trois centres de recherche qui regroupent les différentes spécialités de l'école. Nous distinguons donc :

- Le Centre de Recherche Outillages Matériaux et Procédés (CROMeP), qui mène des recherches dans le domaine de l'optimisation des moules et outillages de mise en forme des matériaux (microstructure, comportement, endommagement et modélisation) et sur les nouveaux matériaux et procédés pour l'aéronautique.
- Le centre de Recherches d'Albi en génie des Procédés des Solides Divisés, de l'Energie et de l'Environnement (RAPSODEE) qui est une Unité Mixte de Recherche du CNRS, qui effectue des recherches sur les procédés industriels de traitement de matériaux sous forme de solides divisés. Des produits typiques sont les poudres (génération, mise en forme, caractérisation), les déchets et la biomasse (valorisation énergétique et matière, dépollution).
- Le Centre Génie Industriel auquel j'étais rattaché.

Le Centre Génie Industriel (CGI) articule son activité autour de trois axes de recherche:

- L'axe intitulé « Organisation, instrumentation et pilotage des projets » qui concentre ses thématiques autour de la gestion de projet avec pour principales préoccupations la gestion des risques, l'implantation des systèmes d'information et les projets coopératifs.
- L'axe intitulé « Gestion des flux en production et dans les réseaux logistiques » dont les dominantes sont la conception et le pilotage des réseaux logistiques et la gestion de production.
- L'axe intitulé « Structuration et exploitation de base de connaissances dans la conception de produits et de processus » au sein duquel trois aspects sont développés: la configuration de produit et les aspects géométriques, le renouvellement des connaissances dans les filières industrielles et enfin l'aide à la décision en ingénierie. Ce dernier aspect est celui qui m'a concerné en premier lieu car ma problématique en était directement issue. Il consiste principalement en la modélisation des connaissances d'un expert sur un domaine précis pour créer un outil permettant d'assister les décisions dans ce domaine.

---

<sup>1</sup> EMAC: [www.enstimac.fr](http://www.enstimac.fr)

<sup>2</sup> GEM: [www.gemtech.fr](http://www.gemtech.fr)



## I.2. L'ENTREPRISE IXAIRCO.

L'entreprise IXAIRCO est une société créée par le groupe IXCORE et 12 PME du Tarn et Garonne. Le cœur de métier d'IXAIRCO est la maintenance, la reconstruction et la customisation des hélicoptères. Cette société a débuté son activité en mars 2007.

Elle offre un ensemble de prestations allant de la maintenance à la reconstruction en passant par la modification d'hélicoptères appartenant principalement à la gamme EUROCOPTER c'est à dire la Gazelle, l'Ecureuil, le Dauphin, le Puma (Figure I) et le Super-Puma. IXAIRCO, grâce à son partenariat avec ces 12 PME du Tarn et Garonne dont l'activité couvre un spectre de compétences très large pouvant répondre à tous les besoins des clients de l'entreprise, dispose d'une compétitivité, d'une flexibilité et d'une réactivité accrue.



*Figure I: Le Puma et le Dauphin.*

Le groupe IXCORE rassemble plusieurs entreprises réparties en quatre pôles. Le pôle IXMARINE Industries regroupe des entreprises spécialisées dans les équipements (imagerie, radar, navigation, ...) destinés à l'industrie maritime depuis les domaines de la pêche et de la marine marchande jusqu'à l'océanographie et le militaire. Le pôle IXLIFE regroupe des entreprises spécialisées dans les domaines des biotechnologies, de la médecine et du développement durable. Le pôle IXTECH regroupe des entreprises spécialisées dans les technologies digitales, acoustiques et de la vision artificielle. Pour finir, le pôle IXAERO, auquel appartient IXAIRCO, est composé d'entreprises travaillant dans le domaine de l'aéronautique depuis la maintenance jusqu'aux équipements.

## II. HELIMAINTENANCE.

### II.1. GENERALITES.

Le projet HELIMAINTENANCE a pour objectifs globaux de devenir le leader européen de la maintenance et de la customisation des hélicoptères moyens et lourds civils, de devenir le leader européen dans le domaine de la recherche en maintenance hélicoptère et de la lutte contre l'obsolescence et de devenir le premier centre européen de services étendus aux opérateurs d'hélicoptères. Ce projet est a été labélisé en tant que projet structurant par le pôle AEROSPACE VALLEY.

Dès 2005 lors de sa conception, le projet HELIMAINTENANCE a affiché l'ambition de réduire de 30% le coût de la maintenance, facteur clé de succès pour le développement de l'hélicoptère. La réponse à cet objectif est déclinée au travers de deux grands axes stratégiques:

- Une organisation industrielle structurée s'appuyant sur des savoir-faire pointus et complémentaires.
- Une démarche R&D qui permet à la structure industrielle de proposer aux opérateurs des prestations de maintenance innovantes et compétitives.

Le projet global est bâti sur trois entités interconnectées:

- Un centre industriel réalisant la maintenance et la customisation des hélicoptères civils.

- Un observatoire de la maintenance et de l'obsolescence, centre de recherche travaillant au profit du centre industriel.
- Un centre de service offrant des prestations globalisées au profit des opérateurs travaillant sur les hélicoptères en s'appuyant sur le centre industriel. Les offres de services seront innovantes et fondées sur le principe de corrélation exacte besoin/service.

Le centre industriel est créé depuis juin 2006. 12 PME locales se sont associées à la société IXCORE pour créer le consortium IXAIRCO qui est le centre industriel du projet. Les deux objectifs recherchés au travers de cette création sont:

- De disposer d'un outil industriel le plus compétitif et réactif possible, couvrant l'intégralité du besoin technique requis par la maintenance des hélicoptères. Le consortium répond à cette attente par la mise en réseau des PME.
- D'avoir un lien direct et permanent avec la R&D en étant tout à la fois l'objet d'études et le centre d'expérimentation et de mise en œuvre.

L'observatoire a débuté son activité depuis septembre 2008. Il a pour objectif de fournir au centre industriel les moyens d'atteindre l'objectif de 30% de réduction des coûts, en mettant en œuvre le projet HELIMaintenance R&D qui concerne deux domaines: l'optimisation des processus industriels de maintenance, comprenant la maîtrise de l'obsolescence, et l'anticipation des défaillances de pièces critiques d'hélicoptères. Le projet favorisera la transition d'une maintenance préventive systématique donc coûteuse à une maintenance proactive et optimisée en fonction du suivi en temps réel des pièces critiques et des travaux de l'observatoire.

Le centre de service sera créé à moyen terme à partir des résultats des travaux de l'observatoire. Parmi les services qui seront certainement proposés, nous pouvons remarquer un service destiné à la formation des mécaniciens et un autre destiné à l'industrialisation et à la vente des innovations produites par l'observatoire.

## **II.2. HELIMAINTEANCE R&D.**

### **II.2.1 Généralités**

La démarche globale de R&D appartient au projet labellisé par le pôle de compétitivité AEROSPACE VALLEY ce qui la rend éligible pour des financements spéciaux offerts par diverses institutions. Le dossier de cette démarche a fait l'objet d'une candidature à des subventions auprès de l'état en 2006 pour un budget de 6,55 M€. La candidature a été ajournée avec pour recommandations de procéder par étapes. Forte de ces recommandations, l'équipe de projet a structuré la démarche en trois étapes qui sont :

- Étape 1 : développement d'un système logistique intégré dédié à la maintenance des PUMAS ou des DAUPHINS.
- Étape 2 : extension du système logistique aux autres types d'hélicoptère.
- Étape 3 : couplage entre le système logistique et les outils de planification d'activité des opérateurs pour l'élaboration des offres de service étendues et innovantes.

Sans remettre en cause les ambitions et objectifs du projet global, mais en les segmentant dans le temps, un nouveau dossier a été présenté concernant la première phase de la R&D élaborée en cohérence avec les contraintes du marché et la taille des partenaires dans un souci de valorisation économique à court terme tel que recommandé par l'Etat. Le budget prévu de ce projet, intitulé HELIMaintenance R&D 1, qui représente l'étape 1 du projet global, est de 2,55 M€

Le projet HELIMaintenance R&D 1 a donc pour objectif le développement d'un système logistique intégré complet comprenant:

- Des capteurs intelligents résidant sur les pièces critiques des hélicoptères PUMA équipés de DATALOGGER radio transmettant sans fil les informations pertinentes vers un ordinateur embarqué.
- Un ordinateur embarqué transmettant, par liaison GPRS, ses informations à une base de données au sol exploitée par l'observatoire.
- Un lecteur portable et automatique des données.
- Des logiciels de calcul temps réel pour les capteurs et le ordinateur.
- Des logiciels d'exploitation des données au sol, connectés avec l'outil de pilotage de la production d'IXAIRCO.
- Des logiciels d'optimisation des processus industriels d'IXAIRCO.
- Et une plate-forme informatique complète en mode web ASP comprenant une base de données et son interconnexion avec les différents outils informatiques.

Le projet HELIMAINTEANCE R&D 1 comprend deux thèmes de recherches qui sont la conception d'un système embarqué de suivi des rechanges critiques et la conception d'un système d'exploitation des données au sol.

Le premier thème regroupe les deux premiers lots de travail. Le lot n°1 traite de l'électronique embarquée avec pour participants l'ONERA (Office National d'Etudes et Recherches Aéronautiques) et les sociétés C3EM, SEMIA et IXAIRCO. Le lot n°2 s'occupe du traitement du signal avec pour participants l'ONERA, l'ISAE (Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace) et les sociétés C3EM et SEMIA.

Le second thème regroupe quatre lots de travail. Le lot n°3 concerne la création d'une plateforme informatique comprenant une base de données et des logiciels d'exploitation et est réalisé par la société C3EM. Le lot n°4 est destiné à établir des pronostics sur les probabilités de défaillances d'équipements ou de sous-systèmes avec pour participants l'ONERA et la société C3EM. Le lot n°5 concerne la planification de la maintenance avec pour participants l'ISAE et les sociétés C3EM et IXAIRCO. Enfin le lot n°6, qui est le cadre de mon stage, est décrit plus en détail dans la partie II.2.2.

Il existe également un lot n°7 qui correspond au portage et au management du projet dans son ensemble et qui est géré par la société IXAIRCO.

## **II.2.2 Le lot n°6.**

Dans le but d'améliorer qualité et performance du processus de maintenance conformément aux objectifs du projet HELIMaintenance, le lot n°6 vise à proposer des approches et des outils pour aider à la décision en maintenance d'hélicoptères. Cette aide à la maintenance exploitera de la connaissance dite « experte » ou « de terrain » qui sera identifiée et capitalisée en étroite collaboration avec les opérationnels.

La maintenance regroupe des décisions pouvant être liées à la date d'intervention, à la solution ou aux équipements et outillages. Il est clair que ces décisions recouvrent un très large spectre d'activités. Le lot proposé considère que, pour certaines de ces décisions, il existe de la connaissance de « terrain » ou de « l'expertise » qui ne peut pas être prise en compte simplement par les outils et méthodes issus de la gestion industrielle. Cette infaisabilité résulte le plus souvent du fait que ce type de connaissance est délicat à identifier et à formaliser. L'aide à la décision exploitant ce type de connaissance s'appuie sur des systèmes à base de connaissances comprenant entre autres les mécanismes de retour d'expérience. Reposant sur un système d'information (ou entrepôt de données) archivant toutes les données et connaissances, ces systèmes peuvent faire appel à des mécanismes de fouille de données (datamining), au raisonnement par analogie (raisonnement à partir de cas) ou encore au raisonnement à base de modèles à partir de fonctions d'évaluation ou de modèles de raisonnement.

L'objectif de ce lot n°6 est de mettre au point un démonstrateur permettant d'évaluer la faisabilité et les intérêts de ces approches pour la maintenance d'hélicoptères.

Les différents intervenants sur ce lot sont le Centre Génie Industriel de l'Ecole des Mines d'Albi-Carmaux (EMAC-CGI), le Laboratoire Génie de Production de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT-LGP) et les sociétés IXAIRCO et C3EM. L'EMAC-CGI travaille depuis plusieurs années sur l'aide à la décision en conception de produit/procédé. Dans ces travaux, le raisonnement à base de modèle (fonction d'évaluation ou modèle de raisonnement) est considéré comme un problème de satisfaction de contraintes. L'EMAC-CGI coopère étroitement avec le ENIT-LGP pour tout ce qui concerne le raisonnement à partir de cas et les processus de retour d'expérience. L'EMAC-CGI assurera la maîtrise d'œuvre de ce lot où l'ENIT-LGP interviendra comme un sous-traitant. La société IXAIRCO est considérée pour ce lot comme l'utilisateur final du système d'aide à la maintenance. En conséquence, tout ce qui touche à la définition des besoins et des méthodes de raisonnement, à la collecte et structuration des connaissances, ainsi qu'à la validation des solutions développées sera conduit en collaboration étroite avec cette société. La société C3EM est chargée du développement de la plate-forme base de données de maintenance. En conséquence, les solutions logicielles étudiées durant ce lot n°6, entre autre les moyens de stockage des bases de cas et de modèles, seront à définir de manière cohérente avec les travaux du lot 3 piloté par C3EM.

Le lot n°6 comprend trois tâches d'une durée d'un an chacune. Il débute par une conception d'ensemble du système durant laquelle sera identifié le domaine d'action ainsi que l'architecture de ce système. Ce cycle aboutira à une phase de conception détaillée du démonstrateur où seront abordés les problèmes logiciels avec la création d'une maquette. Enfin la dernière partie confrontera la maquette de démonstrateur aux réalités du terrain pour en valider le fonctionnement.

### **III. LE PROJET.**

#### **III.1. OBJECTIFS.**

L'objectif visé dans le lot n°6 est de mettre au point un démonstrateur permettant d'évaluer la faisabilité et les intérêts des approches, issues de la gestion des connaissances, du retour d'expérience et des techniques de satisfaction de contraintes, pour la maintenance d'hélicoptères dans un délai de 3 ans. A plus court terme, l'objectif était d'identifier des cas typiques de maintenance où l'aide à la décision pourra intervenir pour améliorer la qualité et les performances de l'activité de maintenance de l'entreprise. La majeure partie du travail réalisé lors de mon stage a donc consisté à comprendre et à formaliser le fonctionnement de l'entreprise et de la maintenance des hélicoptères pour identifier ces cas typiques.

Les tâches à réaliser pour ce stage ont donc été définies pour atteindre cet objectif final. Dans un premier temps, il a fallu se familiariser avec les aspects scientifiques et opérationnels de l'ingénierie des connaissances par retour d'expérience (raisonnement à base de cas) et par propagation de contraintes (raisonnement à base de modèle) au travers d'une étude bibliographique. Ensuite, l'objectif était de faire comprendre aux industriels de la société IXAIRCO, l'étendue des possibilités offertes par l'ingénierie des connaissances par le biais de « Toy Problem » sous forme de diaporamas et ainsi d'aider les industriels à exprimer leurs besoins pour le lot n°6. Après cette phase, le but était de croiser les attentes identifiées avec les partenaires du projet pour la maintenance d'hélicoptères et les propositions de réponses envisageables à la lumière de l'étude préalable réalisée. Il s'agissait également de préciser à ce niveau les verrous qui devraient être levés.

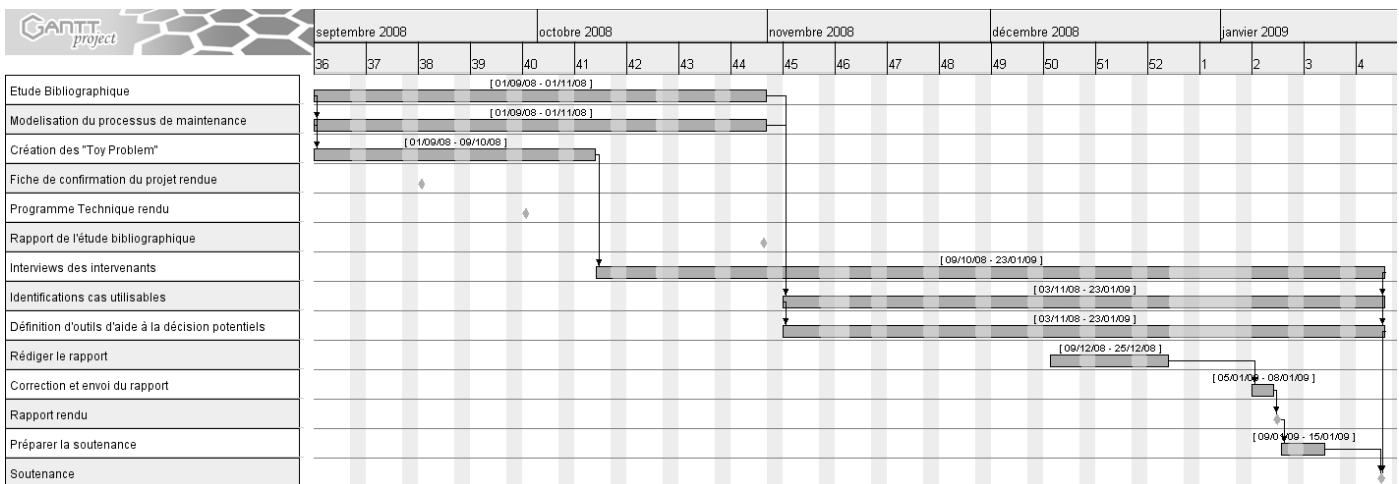
Sur le plan scientifique, la modélisation de la relation entre le processus de maintenance et les mécanismes d'aide à la décision était un axe prioritaire, l'application dans le cadre de la maintenance d'hélicoptères pouvant servir de première validation de la proposition.

#### **III.2. PLANNING.**

Le planning, que nous avons défini lors de la première semaine de ce stage, est représenté par un diagramme GANTT sur la Figure II.

En premier lieu, il était prévu que les deux premiers mois du projet soient consacrés à la réalisation en parallèle de l'étude bibliographique et de la modélisation du processus de maintenance. Il y avait également un jalon positionné mi-octobre qui concernait la présentation aux industriels de la société IXAIRCO des possibilités offertes par l'ingénierie des connaissances. Il fallait donc également réaliser les « Toy Problem » pendant cette période.

Par la suite, le projet était planifié de manière à réaliser un cycle itératif composé de trois tâches. Tout d'abord, une interview des industriels a été faite; à partir de celle-ci des propositions de cas typiques de maintenance ont été formulées pour finalement aboutir à des suggestions d'outils d'aide à la décision sur les cas identifiés. Cet enchaînement, répété aussi souvent que possible, a permis d'intégrer les industriels au processus de recherche et en vue d'obtenir un résultat qui corresponde à leurs besoins.



*Figure II: Diagramme GANTT représentant le planning prévisionnel du projet.*

## **CHAPITRE 2: ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE.**

---

Tout travail de recherche doit être précédé par un état de l'art des activités déjà effectuées sur le sujet à étudier. Dans cette optique, en préambule des travaux scientifiques, une étude bibliographique autour des axes de recherche a été réalisée.

Nous débuterons donc cette étude bibliographique par une présentation de la gestion des connaissances en commençant par quelques généralités puis en exposant l'organisation communément retenue des connaissances et leurs différentes représentations et enfin en présentant le principe de la gestion incrémentale des connaissances.

Nous continuerons par un aperçu sur le retour d'expérience au travers de quelques généralités puis d'une typologie des retours d'expérience et pour finir d'une présentation du raisonnement à partir de cas qui est une technique de mise en œuvre du retour d'expérience.

Ensuite, nous traiterons des problèmes de satisfaction de contraintes. Après une présentation générale, nous aborderons les différents types de variables, de contraintes et de modèles et nous terminerons par les méthodes de résolution et de filtrage sur ces problèmes.

Pour finir, nous aurons un aperçu du couplage entre retour d'expérience et problèmes de satisfaction de contraintes, au sens général, tout d'abord, pour comprendre l'intérêt d'une telle combinaison puis au travers d'applications déjà réalisées.

### **I. GESTION DES CONNAISSANCES.**

Cette partie est principalement basée sur les travaux suivants : [Bergmann, 2002], [Grundstein, 2002], [Rakoto, 2004] et [Béler, 2008].

#### **I.1. GENERALITES**

La gestion des connaissances ou « Knowledge Management » est une discipline qui englobe un très grand nombre de concepts à propos des méthodes utilisées par les organisations, en particulier dans l'industrie, pour capitaliser, gérer et utiliser les connaissances. Un processus de gestion des connaissances [Lebowitz, 1999] est généralement constitué d'une démarche de capitalisation, qui vise à rassembler, trier, analyser et stocker la connaissance pertinente, et d'une démarche d'exploitation, qui vise à diffuser la connaissance dans la structure en vue d'une réutilisation ultérieure soit en réinjectant la connaissance dans les processus opérationnels pour en améliorer le fonctionnement, soit en utilisant cette connaissance pour former les futurs acteurs.

Cette problématique est caractérisée par [Grundstein, 2002] (Figure III) au travers des cinq processus suivants:

- « Repérer » qui consiste à identifier les connaissances cruciales,
- « Préserver » qui consiste à modéliser, formaliser et stocker ces connaissances,
- « Valoriser » qui consiste à diffuser les connaissances dans l'organisation,
- « Actualiser » qui concerne la mise à jour constante des connaissances,
- « Manager » qui consiste à gérer ce cycle et à le faire vivre.

Cette démarche présente un certain nombre de difficultés pour être intégrée aux processus opérationnels notamment pour être acceptée puis adoptée par les acteurs de l'organisation. Nous distinguons donc deux types de d'approches complémentaires pour résoudre ce problème. La première concerne la motivation des acteurs qui dépend plus d'aspects sociaux et managériaux. La seconde, qui développe des processus standardisés et des outils supports adaptés, facilite la capitalisation et intéresse les acteurs au projet.

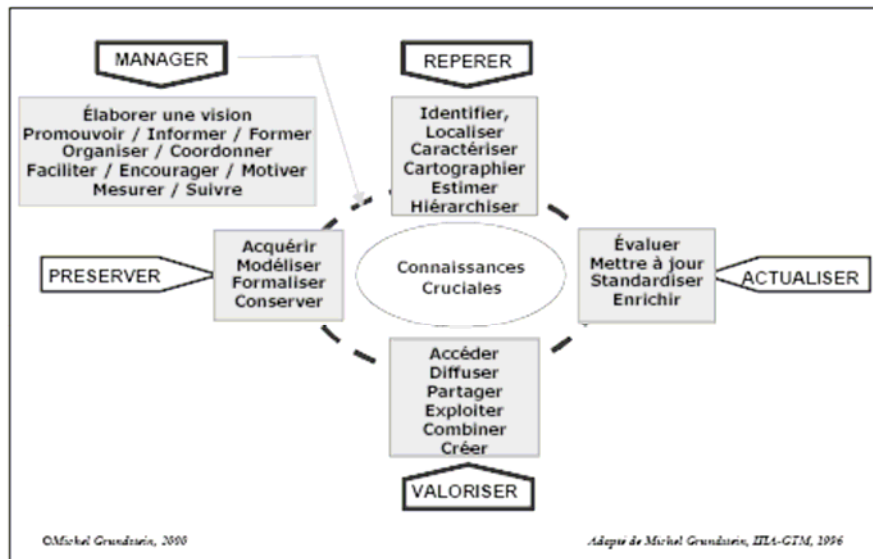


Figure III: Problématique de la capitalisation des connaissances d'après [Grundstein, 2002].

## I.2. ORGANISATION DES CONNAISSANCES.

### I.2.1 Données, Informations, Connaissances, Savoir-faire et Expérience.

Les outils de gestion des connaissances ne manipulent pas uniquement des connaissances mais aussi des données et des informations. Nous allons donc distinguer ces trois notions en y ajoutant la notion de Savoir-faire d'après les travaux de [Rakoto, 2004] et [Béler, 2008] (Figure IV).

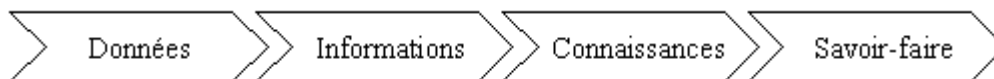


Figure IV : Distinction Données / Informations / Connaissances / Savoir-faire.

La notion de données caractérise des faits ou des éléments non reliés entre eux et hors contexte donc sans aucune valeur informative. Ce sont des données brutes non analysées. Un exemple de donnée peut être un nombre seul (43500).

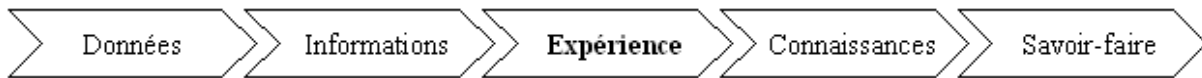
La notion d'informations caractérise un ensemble de données intelligibles mises en relation pour donner du sens. Les relations entre les données introduisent une valeur informative et donc de contexte. Elles peuvent facilement être structurées et enregistrées dans une base de donnée. Un exemple d'information peut être « la vitesse de rotation de la turbine d'hélicoptère de type Gazelle est de 43500 tr/min ».

La notion de connaissances caractérise des informations analysées pour en extraire la valeur ajoutée qui permettra la création de nouvelles informations. Un exemple de connaissance structurée sous la forme de règle logique peut être « SI l'hélicoptère de type Gazelle est en fonctionnement nominal ALORS sa turbine tourne à 43500 tr/min ».

La notion de savoir-faire caractérise la manière d'utiliser les connaissances de façon pertinente pour atteindre un objectif (résoudre un problème, concevoir un produit, usiner une pièce, ...). Ce savoir-faire est étroitement lié à une personne en particulier en fonction de son expérience et de ses compétences.

Selon [Bergmann, 2002], la gestion de l'expérience (Experience Management) correspond à la gestion des connaissances limitée aux connaissances issues de l'expérience. Il y a donc un lien particulier entre expérience et connaissances. En effet, l'expérience est construite en analysant, à l'aide d'experts dans le domaine, les informations issues du processus opérationnel. Ces connaissances extraites par les experts de façon plus moins explicites sont dites opérationnelles et sont généralisables

pour obtenir un savoir contenant les connaissances issues de l'expérience. [Rakoto, 2004] et [Béler, 2008] proposent donc de faire correspondre l'expérience à un stade intermédiaire entre informations et connaissances (Figure V).



*Figure V: Positionnement de l'expérience par rapport aux autres notions.*

## **I.2.2 Caractérisation des connaissances.**

- Connaissances tacites ou explicites.

Cette distinction issue de la psychologie cognitive [Polanyi, 1969] a été reprise en gestion des connaissances par [Heldlund et Nonaka, 1993].

Elle décrit la connaissance tacite comme étant abstraite, issue des représentations mentales, difficile à transmettre car non formalisée. Ce type de connaissances correspond à des connaissances innées ou apprises et au savoir-faire. Par exemple, la façon de composer une œuvre d'art est une connaissance tacite car quasiment impossible à expliciter.

La connaissance explicite correspond, quant à elle, à la connaissance formalisée facilement transmissible à l'oral ou à l'écrit. Elle dispose d'un vocabulaire précis et peut être informatisée au sein d'une base de connaissance. Par exemple, une recette de cuisine ou encore une procédure de maintenance sont des connaissances explicites.

- Connaissance individuelle ou collective.

Chaque individu dispose de ses propres connaissances qu'il gère intuitivement à sa manière, c'est la connaissance individuelle. Celle-ci permet à chacun d'extraire de la connaissance à partir d'informations pour valoriser sa connaissance. Cependant, il existe d'autres connaissances, dites collectives [Duizabo et Guillaume, 1996], qui sont partagées entre plusieurs individus. Lorsqu'elle est formalisée et partagée, elle peut avoir un sens collectif que l'on retrouve, par exemple, dans les « connaissances des entreprises » [Prax, 1997].

## **I.2.3 Dynamique des connaissances.**

Lors de la manipulation des connaissances, nous pouvons remarquer qu'elles effectuent des allers-retours entre connaissances tacites et explicites et entre connaissances individuelles et collectives. [Baumard, 1996] a défini cette dynamique au travers de la Figure VI.

On peut aisément distinguer un cycle « classique » entre les états définis par [Nonaka, 1969]. Dans un premier temps, la connaissance est explicite et collective, c'est la phase d'apprentissage. Puis elle devient tacite et individuelle, c'est la phase d'intériorisation où la connaissance intègre des schémas mentaux (phénomène de l'intuition). Ensuite elle devient explicite et individuelle, c'est la phase d'expertise où elle peut être enseignée à d'autres redevenant ainsi explicite et collective. Cependant, en dehors de ce cycle, certaines connaissances qui sont connues de l'ensemble des acteurs deviennent tacites et collectives, elles intègrent alors les pratiques sociales. Il est à noter, toutefois qu'il existe d'autres moyens pour la connaissance de passer indifféremment d'un état à l'autre sans utiliser le cycle décrit précédemment (Figure VI).



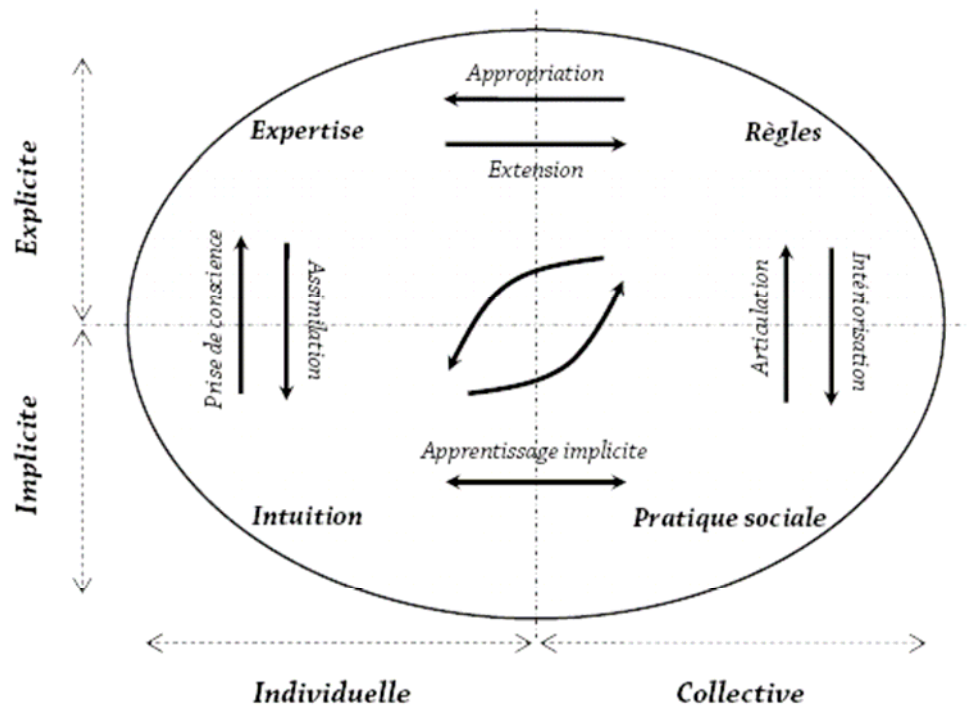


Figure VI : Dynamique des connaissances d'après [Baumard, 1996].

### I.3. REPRÉSENTATION DES CONNAISSANCES.

#### I.3.1 Représentation des connaissances basée sur la logique.

Les langages logiques ont été les premiers à être utilisés pour représenter les connaissances. Ils sont basés sur des concepts d'origine mathématique telles que la logique de proposition et la logique des prédicats.

Une expression logique est composée d'un système de symboles et de règles qui définissent la syntaxe (la forme) du langage et d'une interprétation qui définit la sémantique (le fond ou contenu) du message. Ensuite un moteur d'inférence (système destiné à la déduction) utilise plusieurs expressions logiques (la base de connaissances) pour raisonner en créant des démonstrations et des expressions nouvelles qui sont intégrées à la base de connaissances. Ces mécanismes d'inférence servent à répondre à la question posée.

C'est sur ce principe que reposent les approches de représentation des connaissances basées sur la logique, l'objectif étant de construire de nouvelles expressions par inférence à savoir par déduction (c'est à dire en produisant des résultats à partir de règles logiques), induction (c'est à dire en produisant des règles logiques à partir de résultats) ou alors abduction (c'est à dire en supprimant les solutions improbables ou impossibles). Il faut également noter que nous pouvons distinguer les systèmes de raisonnement basés sur la logique en fonction du niveau d'axiomatisation c'est à dire du niveau de complétude des connaissances du système [Wang 2006].

Le principal avantage de ces approches est qu'elles sont bien adaptées à une large gamme de tâches de représentation [Hayes, 1977] [Moore, 1982]. Son principal inconvénient réside dans la difficulté à lire et à comprendre ce genre de langages.

#### I.3.2 Représentation des connaissances basée sur les « frames ».

Le principe de « frames » a été introduit par [Minsky, 1975] pour représenter les connaissances acquises par la vision. Cette approche a servi de base à certains travaux sur les langages de programmation orientés objet en plus de son utilisation dans les systèmes à base de connaissances.

Un « frame » est une structure destinée à organiser la connaissance et contenant un nom et un ensemble d'attributs qui peuvent être caractérisés selon plusieurs points de vue grâce à une

représentation sous forme de facettes. Cette notion de facette est primordiale dans les modèles de représentation des connaissances à base de frames car chaque facette d'un attribut permet de visualiser l'attribut sous un angle différent. Par exemple, il existe une facette qui permet de visualiser la valeur de l'attribut, de calculer une valeur par défaut ou encore de vérifier la validité de l'attribut. L'objectif de cette représentation très flexible et non-formelle est de combler les lacunes des langages logiques notamment en ce qui concerne la lisibilité de la représentation.

Le moteur d'inférence de ces modèles privilégie l'utilisation de « l'appariement » qui consiste à comparer un « frame » volontairement incomplet (équivalent à une requête en base de donnée) avec les « frames » de la base de connaissance en fonction de leurs facettes pour ainsi compléter le « frame » incomplet avec la connaissance contenue dans la base de connaissance.

Le principal inconvénient de cette représentation est le manque de formalisation et ses principaux avantages sont sa lisibilité et sa flexibilité.

Ces deux approches ont été combinées au sein des approches hybrides [Nebel, 1990] pour palier aux lacunes qui sont liées à chacune d'entre elles. Parmi ces approches hybrides, nous distinguons : les réseaux sémantiques [Quillian, 1966], les graphes conceptuels [Sowa, 1984] qui sont une évolution des réseaux sémantiques, la représentation des connaissances par objet [Carré, 1989] et les logiques de description [Brachman et Levesque, 1985]. De plus, il faut ajouter à ces approches hybrides, la représentation des connaissances orientée objet qui utilise des langages de programmation orientés objet [Knublauch, 2002] et notamment le langage UML <sup>3</sup> [Cranefield et Purvis, 1999].

#### **I.4. LA GESTION INCREMENTALE DES CONNAISSANCES.**

Il existe deux types de méthodes pour gérer les connaissances, les méthodes descendantes ou ascendantes.

Les méthodes descendantes consistent à appliquer un modèle générique de connaissance à un domaine particulier. Elles sont utilisées dans la plupart des méthodologies de conception des Systèmes à Base de Connaissance à partir de processus séquentiels dont le but est de produire systématiquement des systèmes complexes et fonctionnels. Il existe de nombreuses méthodologies proposant des modèles de représentation des connaissances et des supports méthodologiques destinés à la mise en place de systèmes de gestion des connaissances telles que la méthode CommonKADS [Schreiber et al., 1994] ou encore MKSM [Ermine et al., 1996]. Elles sont basées sur la modélisation de la connaissance d'experts du domaine ce qui pose certains problèmes notamment dus au manque de disponibilité des experts et à leur réticence à livrer leur savoir et savoir-faire. L'intégration de ces méthodes présente des inconvénients notamment parce qu'elles sont de plus très consommatrices en temps et en ressources humaines.

Les méthodes ascendantes consistent à construire une base de connaissances à partir de fragments de connaissance. Ce sont les méthodes associées au retour d'expérience (voir partie II). Leur objectif est donc de réutiliser l'expérience pour éviter de reproduire les erreurs passées et ainsi améliorer le fonctionnement de l'entreprise [Bergmann, 2002]. Ce type de gestion des connaissances peut être directement intégré aux processus opérationnels avec des objectifs précis, ce qui en fait un outil très utile pour les entreprises. De plus, l'analyse et la généralisation de l'expérience peuvent également servir à construire de la connaissance générique. Cependant, cette construction de connaissance n'est pas aisée à cause de la nécessité de disposer d'un nombre conséquent d'expériences pour construire une connaissance complète. Les principaux avantages de ces méthodes sont la facilité de formalisation de l'expérience qui rend le processus de capitalisation transparent pour les experts qui acceptent ainsi plus facilement l'implantation de ces méthodes, et, d'autre part, les possibilités d'évolution de la base de connaissances qui s'agrandit au fil des expériences en fonction des besoins de l'organisation.

---

<sup>3</sup> Unified Modeling Language

## II. LE RETOUR D'EXPERIENCE.

Cette partie est principalement basée sur les travaux suivants pour présenter le concept de retour d'expérience: [Aamodt et Plaza, 1994], [Bergmann, 2002], [Rakoto, 2004], [Ruet, 2004]et [Béler, 2008].

### II.1. GENERALITES.

Le principe du retour d'expérience est très ancien et utilisé dans de nombreux domaines car l'homme réutilise instinctivement ses expériences passées pour améliorer son mode de vie ou de travail. De plus, il s'est organisé pour transmettre ses connaissances à la collectivité et à sa descendance au travers de l'enseignement mais aussi de l'art.

De tout temps, l'homme a donc utilisé le retour d'expérience à l'aide de processus similaires à ceux utilisés actuellement dans les entreprises comme le montre cette citation traitant du domaine agricole issue de l'ouvrage de Columella intitulé « *De re rustica* » traduite par [Cuneo, 2003]: « *le chef de famille qui tient à avoir une méthode sûre pour cultiver ses terres se donnera la peine de consulter les fermiers les plus expérimentés de son époque ; et il devrait étudier avec soin les manuels des Anciens, réfléchir sur les opinions, sur les enseignements de chacun d'entre eux, pour voir si la leçon reçue peut s'appliquer telle quelle à son cas ou si elle doit être revue* ».

Le retour d'expérience consiste donc en l'analyse des faits passés pour réutiliser les connaissances. Cependant les définitions du retour d'expérience varient en fonction du domaine considéré. Ainsi, les acteurs de la gestion des risques, [Vérot, 2001] et [REXAO, 2003], mettent l'accent sur les notions d'« anomalies » et de « dysfonctionnement » c'est à dire sur le traitement d'évènements négatifs. D'un autre point de vue, [Bergmann, 2002] généralise le principe de retour d'expérience, sous le nom d'« Experience Management », à tous les types d'évènements mais restreint sa définition à la résolution de problèmes donc de faits négatifs. D'autre part, le gouvernement américain au travers de son Département de l'Energie [Bickford, 2000], s'intéresse au concept de « Lesson Learned » (littéralement Leçon Acquisée) en y intégrant la notion de « bonne pratique ».

Pour finir, la définition proposée par [Rakoto et al., 2002] et reprise par [Clermont et al., 2007] et [Béler, 2008] semble la plus complète en reprenant les aspects évoqués au travers des différentes propositions ci-dessus:

*« Le retour d'expérience est une démarche structurée de capitalisation et d'exploitation des connaissances issues de l'analyse d'événements positifs et/ou négatifs. Elle met en œuvre un ensemble de ressources humaines et technologiques qui doivent être organisées pour contribuer à réduire les répétitions d'erreurs et à favoriser certaines pratiques performantes. »*

### II.2. TYPOLOGIE DES RETOURS D'EXPERIENCE.

Comme nous l'avons vu au travers de ces définitions, le retour d'expérience peut prendre des aspects différents selon le contexte dans lequel il est utilisé. Ils peuvent donc être classés selon trois axes majeurs: le retour d'expérience de crise, statistique et cognitif.

#### II.2.1 Le retour d'expérience de crise :

Ce type de retour d'expérience n'est mis en œuvre qu'en cas de catastrophe naturelle, technologique ou humaine comme par exemple après un tremblement de terre ou un attentat. Ce type de démarche, au travers d'enquêtes administratives faites par des comités de spécialistes ou de crise, cherche généralement à empêcher que la catastrophe se reproduise ou le cas échéant, à limiter le nombre de victimes si le même type de catastrophe se reproduit.

Dans cette optique, [Grelot et Guillaume, 2004] proposent de répondre aux questions suivantes:

- Qu'est ce qui s'est passé ?
- Comment cela s'est-il passé ?
- Pourquoi cela s'est-il passé ainsi ?

- Que faut-il faire pour que « la prochaine fois » les conséquences soient moins dramatiques ?

Ce type de retour d'expérience est très souvent utilisé par les gouvernements et les collectivités territoriales qui ont beaucoup étudié la méthodologie de ce type d'action. Nous retrouvons donc facilement des documents présentant en détails cette méthodologie et mis à disposition des collectivités par l'État [MIAT, 2006].

## **II.2.2 Le retour d'expérience statistique :**

Le retour d'expérience statistique nécessite une quantité de données suffisamment importante pour pouvoir appliquer les techniques mathématiques sur les statistiques. Il n'est donc pas applicable à tous les contextes.

Pour illustrer ce concept, nous pouvons citer la banque de données ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) exploitée par le Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles (BARPI) qui vise à collecter des informations sur les incidents et accidents industriels survenus dans le monde et plus particulièrement en France pour faciliter le retour d'expérience. Elle contient actuellement plus de 32000 cas traitant aussi bien de la pollution agricole que des installations industrielles.

Un autre exemple intéressant provient de la société COGEMA, entreprise du secteur nucléaire, qui a mis en place une démarche de retour d'expérience statistique intitulée REX-FIAB [Delahaye, 1996] visant à éditer des états de fiabilité sur les équipements de l'entreprise.

## **II.2.3 Le retour d'expérience cognitif :**

Le retour d'expérience cognitif répond à un besoin pour les problèmes où il n'y a pas suffisamment de données pour faire un traitement statistique. Il devient donc nécessaire de faire intervenir la connaissance d'experts du domaine pour compenser le manque de données statistiques. Nous introduisons par conséquent un formalisme particulier destiné à collecter cette connaissance experte contextuelle.

Un exemple de ce type de retour d'expérience provient de [Rakoto, 2004] qui a formalisé une architecture de retour d'expérience destinée à Alstom Transport, entreprise du secteur ferroviaire fabriquant des trains. L'objectif de ce travail était d'alimenter une mémoire d'entreprise organisée autour de la gestion des connaissances pour diminuer les risques de cloisonnement et le manque de partage d'information au sein de l'entreprise.

## **II.2.4 Conclusion**

Les différents types de retour d'expérience présentés précédemment appartiennent tous à la catégorie des retours d'expérience événementiels qui est la plus répandue. Ils sont généralement associés à un événement, exceptionnel ou non, et ont pour but la compréhension des causes de l'événement pour éviter ou favoriser sa récurrence. Il faut cependant savoir que le retour d'expérience n'est pas forcément basé sur les événements. Par exemple, le retour d'expérience « signaux faibles » [Gaillard, 2005] vise à anticiper la survenue d'un événement en recherchant et en analysant des signaux qui ne seraient pas perçus comme dangereux par l'appareil de prévention de risques. Il est principalement utilisé par les entreprises connaissant peu d'accidents mais dont les conséquences seraient désastreuses.

Il est également possible de différencier les techniques de retour d'expérience en fonction du type d'événement qu'elles exploitent. En effet, les événements négatifs (accidents, incidents, anomalies, ...) sont plus simples à exploiter à l'aide des méthodes de résolution de problèmes qui sont facilement intégrables aux processus opérationnels existants. On commence, cependant, à voir apparaître un retour d'expérience basé sur les « bonnes pratiques » (aussi appelé « retour d'expérience positif ») dans de grandes entreprises. L'objectif est d'identifier et de capitaliser ces « bonnes pratiques » pour travailler sur des informations positives. Ce type de retour d'expérience est généralement mieux accepté dans les entreprises car les gens ne se sentent pas jugés par ce type de méthode.

## II.3. LE RAISONNEMENT A PARTIR DE CAS.

Le Raisonement à Partir de Cas (RàPC) ou en anglais « Case Based Reasoning (CBR) » est une technique d'aide à la décision apparentée au retour d'expérience car elle vise à réutiliser des « cas » passés pour résoudre un problème. Il faut toutefois noter que le retour d'expérience est un processus engageant des ressources humaines et techniques qui définit un certain nombre d'outils et de techniques pour alimenter ses sous-processus. Le RàPC, quant à lui, est une technique d'aide à la décision qui peut être utilisée pour mettre en œuvre le retour d'expérience mais qui peut aussi être utilisée indépendamment pour d'autres applications.

### II.3.1 Généralités.

Le principe du raisonnement à partir de cas consiste à regrouper les connaissances sous forme de « cas » dans une base de données appelée « base de cas ». Un cas rassemble les descriptions du problème, de sa méthode de résolution et de la solution qui lui a été apportée, formalisées à l'aide d'un ensemble de paramètres.

Les valeurs de ces paramètres permettent de différencier les cas entre eux, de les classer et de les comparer à un nouveau problème lorsqu'il se présente. L'objectif de cette comparaison est de découvrir des cas similaires au problème courant pour en récupérer les solutions et les adapter à ce problème.

Ce mode de raisonnement ressemble beaucoup au raisonnement humain. En effet, chacun d'entre nous se sert de son expérience passée pour trouver des situations similaires à sa situation actuelle et les adapte pour définir le comportement adéquat pour chaque nouvelle situation. Il est donc particulièrement adapté à l'utilisation des connaissances d'experts qui utilisent principalement leurs expériences et leurs compétences acquises au fil du temps pour prendre leurs décisions.

### II.3.2 Le cycle du RàPC.

Voici un schéma (Figure VII) inspiré des travaux de [Aamodt et Plaza, 1994] résumant les différentes étapes de ce cycle du raisonnement à partir de cas :

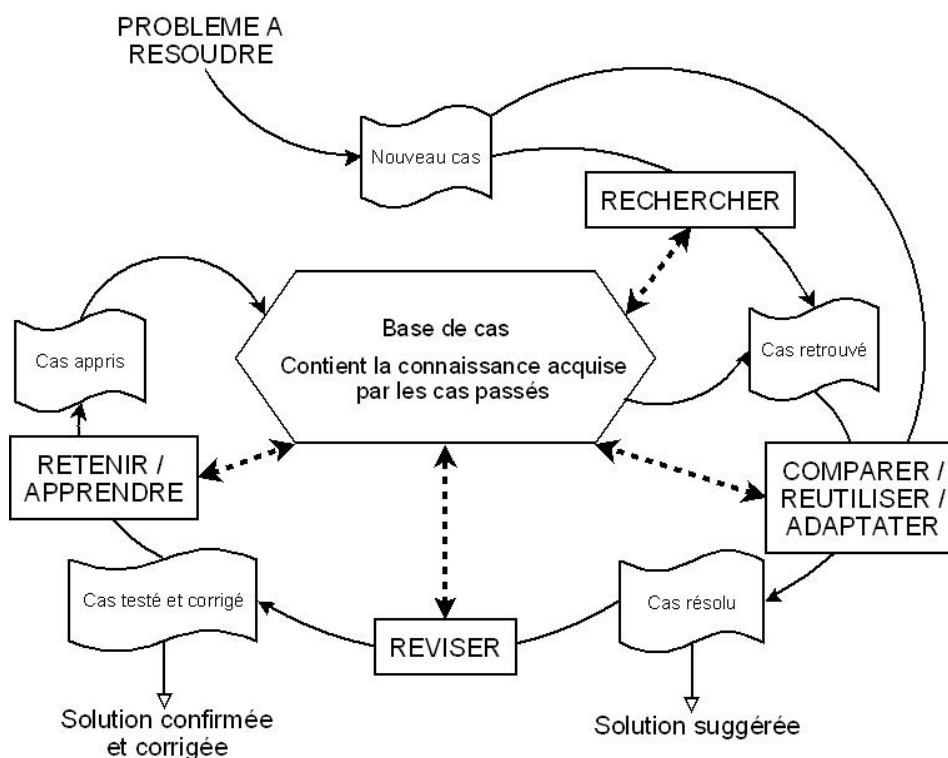


Figure VII : Le cycle du RàPC inspiré de [Aamodt et Plaza, 1994]

Le cycle du RàPC se décompose donc en plusieurs étapes :

○ La formalisation du nouveau cas :

L'objectif de cette formalisation des cas est de fournir une base au RàPC. Selon [Kolodner, 1993], un cas se compose généralement de trois types d'informations:

- Une description du problème.
- Une description de la solution choisie.
- Une justification du choix de la solution et de la démarche utilisée pour trouver cette solution.

Lors de la création d'un nouveau cas, il faut renseigner la description du problème et, par la suite, durant la phase de raisonnement, compléter notre cas.

○ La recherche de cas passés :

Le nouveau cas, maintenant formalisé, est comparé à la base de cas pour extraire les cas passés similaires à notre cas courant. Nous utilisons alors successivement deux mécanismes pour cette extraction.

Tout d'abord, nous procédons à un filtrage visant à réduire le nombre de cas passés potentiellement similaires. Ce filtrage est basé sur des techniques d'indexation permettant d'orienter la recherche vers les cas les plus pertinents. La principale difficulté de l'indexation est de trouver un compromis entre efficacité du filtrage et diminution du risque d'éliminer un cas pouvant être pertinent pour le deuxième mécanisme.

On obtient alors un ensemble de cas passés qui sont comparés un par un au cas courant à l'aide d'une mesure de similarité pour déterminer un degré de similarité. Il existe de nombreuses mesures de similarité qui sont adaptées à un contexte particulier et aux types d'informations traitées. Par conséquent, chaque domaine a son propre système de mesure. Les cas dont la similarité est la plus importante sont retenus pour l'étape suivante.

○ L'adaptation de la solution :

L'adaptation de la solution est cruciale dans un cycle de RàPC car son rôle est de réutiliser le cas passé similaire à notre cas courant pour en adapter la solution ou la démarche de résolution entièrement ou en partie pour correspondre au problème courant.

Selon [Aamodt et Plaza, 1994], il existe trois façons de réutiliser les cas passés :

- La copie qui consiste à reprendre la solution du cas source (cas similaire) et à la réutiliser telle quelle. Les modifications éventuelles seront effectuées par l'utilisateur s'il le souhaite.
- L'adaptation par transformation de la solution où le système peut adapter la solution pour le problème courant. Généralement, ces méthodes utilisent des opérateurs de transformation qui, en analysant les différences entre le cas courant et le cas source, modifient la solution.
- L'adaptation par transformation de la méthode de résolution qui est basée sur des idées similaires à l'adaptation par transformation de la solution mais appliquées sur la méthode de résolution. C'est à dire que nous réutilisons le processus de résolution utilisé pour le problème retrouvé en l'adaptant au problème courant pour déterminer une solution à ce dernier.

○ La révision de la solution :

Cette révision consiste à rechercher les erreurs éventuellement contenues dans la solution proposée lors de l'étape d'adaptation. Certains systèmes contiennent un module de révision automatique, cependant dans la majorité des cas, la révision est faite par l'utilisateur (généralement un expert du domaine).

○ L'apprentissage du cas :

Cette étape consiste à déterminer s'il faut mémoriser le cas courant. Il convient d'enregistrer la description du problème, sa solution mais aussi sa méthode de résolution. La principale problématique de cette étape réside dans le choix des informations qui seront stockées pour vérifier qu'elles seront utilisables et utilisées pour de futurs cas.

Pour faire cette étape, [Aamodt et Plaza, 1994] proposent une méthode en trois phases :

- Une phase d'extraction qui consiste à choisir les informations que l'on souhaite enregistrer.
- Une phase d'indexation qui consiste à formaliser ces informations et à les indexer de manière à les retrouver facilement plus tard.
- Une phase d'intégration qui consiste à adapter le modèle de RàPC pour qu'il tienne compte des informations du cas courant. Pour vérifier la validité du modèle, il suffit de faire repasser le nouveau cas dans le modèle de RàPC pour vérifier qu'il nous propose la solution qui a été trouvée réellement.

Pour finir, il faut ajouter qu'il existe plusieurs extensions du raisonnement à partir de cas pour en améliorer les performances ou en étendre le domaine d'application comme le raisonnement à partir de trace [Champin et al., 2004] et le raisonnement à partir d'expérience [Sun et Finnie, 2004].

### **II.3.3 Représentation des cas.**

Il existe trois principales méthodes pour représenter les cas qui offrent des possibilités différentes quant à l'utilisation des connaissances que l'on peut en faire.

○ L'approche textuelle:

Il est possible de décrire les cas sous forme de texte libre [Lenz et al., 1998][Shimazu, 1998]. Cette méthode est très utilisée dans les domaines où une grande partie du savoir-faire est déjà écrite, par exemple sous forme de fiches d'instructions. L'utilisateur doit également être capable de consulter et d'utiliser l'expérience contenue dans ces documents immédiatement. Lorsque les cas sont formalisés de cette manière, la méthode de recherche des cas passés la plus répandue consiste à effectuer une recherche par mots-clés. Ce type d'approche est bien adapté lorsqu'il y a moins de 200 cas différents et que chaque cas possède un résumé contenant les mots-clés du cas.

○ L'approche conversationnelle:

Un autre moyen de représenter les cas consiste à capturer la conversation entre l'agent (qui décrit le cas) et le client (qui récupère l'information). Cette méthode, nommée approche conversationnelle [Aha et Breslow, 1997], représente les cas sous la forme d'une liste de questions / réponses qui varie d'un cas à un autre sans standardisation. Pour indexer les cas, les problèmes et les questions sont classés à l'aide de structures hiérarchiques de type « arbre » et chaque cas est positionné manuellement dans ces structures. Ce type d'approche est très utilisé lorsqu'il y a beaucoup de cas simple, c'est à dire avec très peu de questions nécessaires pour prendre une décision.

○ L'approche structurelle:

L'idée dans ce type d'approche est de représenter les cas à l'aide d'un vocabulaire structuré limitant la représentation de l'expérience à ce qui peut être exprimé par ce vocabulaire [Yokoyama, 1990] [Aamodt, 1991]. Il y a plusieurs types de représentations possibles, les plus répandues étant les tables de type attribut-valeur, l'orienté-objet ou encore sous forme de graphes de structure. Dans ce type d'approche, chaque attribut doit appartenir à la base de donnée et chaque valeur doit être standardisée. Ce type d'approche est utilisé lorsque des connaissances supplémentaires, autre que les cas, doivent être utilisées pour fournir de bons résultats.

### III. PROBLEMES DE SATISFACTION DE CONTRAINTES.

Cette partie est principalement basée sur les travaux suivants : [Tsang, 1993], [Fargier et Henocque, 2002], [Dechter, 2003], [Vernat, 2004], [Vareilles, 2005], [Verfaillie et Jussien, 2005], [Van Oudenhove, 2006] et [Van Oudenhove et al., 2006].

#### III.1. GENERALITES.

Les problèmes de satisfaction de contraintes aussi appelés *Constraint Satisfaction Problems (CSP)* en anglais, ont pour objet la modélisation de connaissance sous forme de règles ou contraintes dans l'optique de raisonner avec ce modèle. Le format des CSP a été introduit par [Montanari, 1974].

Chaque CSP est constitué de variables, de leurs domaines et de contraintes agissant sur les variables. Comme l'illustre la Figure VIII, un CSP est généralement représenté sous la forme d'un triplet  $(X, D, C)$  [Dechter, 2003] avec :

- $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  l'ensemble fini des variables du problème.
- $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$  l'ensemble fini des domaines de définition des variables où  $D_i$  correspond à la variable  $X_i$ .
- $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$  l'ensemble des contraintes du problème où chaque  $C_i$  est une relation agissant sur une ou plusieurs variables appartenant à  $X$ .

Une solution du CSP est caractérisée lorsque qu'à chaque variable est affectée une valeur (on dit que toutes les variables sont instanciées) et que toutes les contraintes sont satisfaites (une contrainte étant satisfaite lorsque l'instanciation des variables la concernant respectent la contrainte).

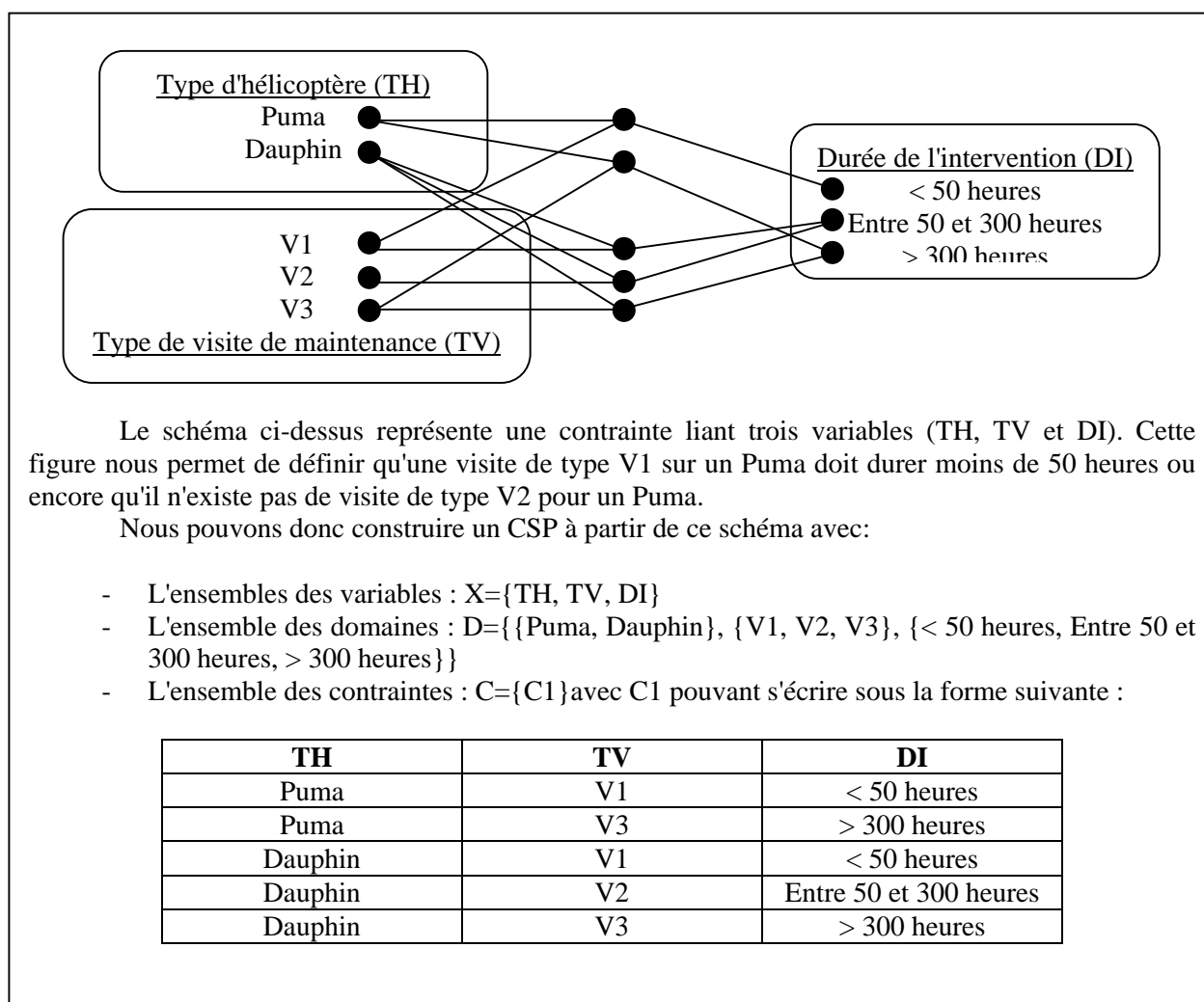


Figure VIII : Exemple simple de CSP



Il est donc possible de construire le modèle de connaissance sous forme d'un CSP en modélisant la connaissance d'un expert sur un problème donné sous forme de contraintes [Vareilles, 2005] [Vernat, 2004]. On obtient ainsi un outil d'aide à la décision pouvant assister l'expert lors de la résolution d'un problème.

### III.2. LES VARIABLES.

Il existe différents types de variables selon la nature des valeurs qui peuvent leur être affectées ainsi il existe les variables symboliques (obligatoirement discrètes) ou numériques, ces dernières pouvant être discrètes ou continues. Voici un schéma (Figure IX) montrant la classification des variables [Vareilles, 2005] :

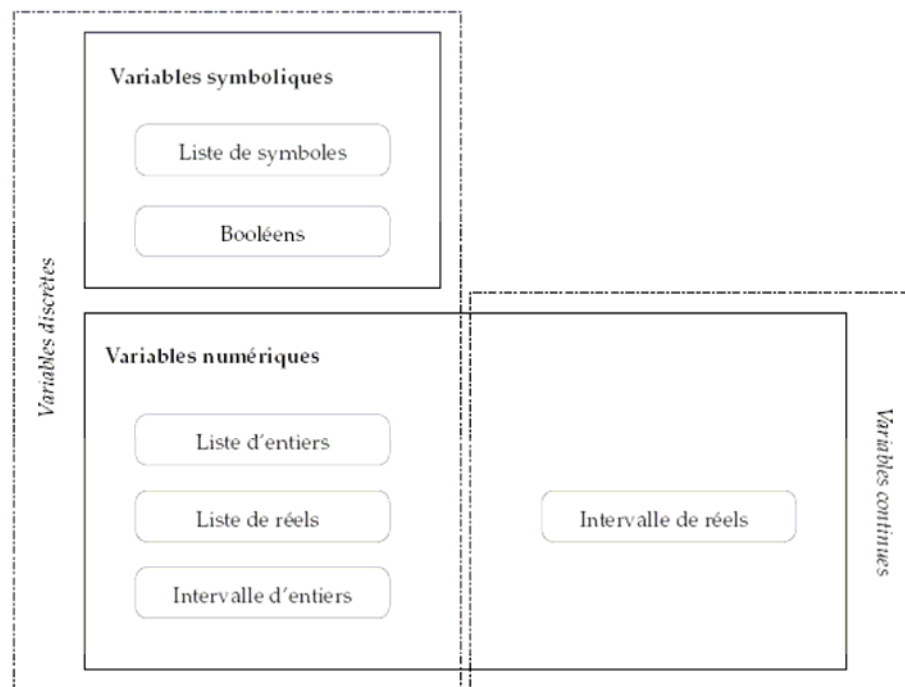


Figure IX : Classification des variables selon [Vareilles, 2005]

#### III.2.1 Variables discrètes.

Les variables discrètes ont pour domaines un ensemble limité de valeurs prédéfinies et discontinues. Leurs domaines sont donc généralement représentés sous forme de liste ayant un nombre fini de valeurs.

Les variables symboliques ont pour domaines une liste de symboles, elles sont donc par nature discrètes. Par exemple, dans notre problématique, nous pouvons considérer la variable symbolique caractérisant le type d'hélicoptère qui a pour domaine une liste de noms d'hélicoptères.

*Variable symbolique : Type\_Hélicoptère={PUMA, DAUPHIN, GAZELLE, ...}*

Les variables numériques discrètes ont pour domaines des listes de nombres (entiers ou réels) prédéfinis ou des intervalles d'entiers. Par exemple, dans notre cas, nous pouvons considérer la variable numérique discrète caractérisant le nombre d'atterrissage qui a pour domaine un intervalle d'entiers.

*Variable entière : Nombre\_Atterrissage=[0, ∞]*

### III.2.2 Variables continues.

Les variables numériques continues ont pour domaines des intervalles de réels. Par exemple, nous pouvons considérer la variable caractérisant la durée de l'intervention de maintenance qui a pour domaine un intervalle de réels.

*Variable réelle : Durée \_Intervention=[10,5000]*

### III.3. LES CONTRAINTES

Une contrainte est une relation explicite entre des variables qui permet de restreindre les valeurs possibles de ces variables. Il existe deux manières de définir des contraintes élémentaires : sous forme extensive ou intensive. Ces contraintes peuvent être combinées à l'aide de contraintes logiques pour former des contraintes plus complexes [Vareilles, 2005] [Vernat, 2004].

Il y a deux natures de contraintes. Les contraintes permettant de restreindre les valeurs autorisées pour un ensemble de variables et des contraintes permettant de modifier la structure du problème courant.

#### III.3.1 Contraintes extensives.

La contrainte extensive (ou en extension) est une relation qui décrit la liste explicite et exhaustive de toutes les instanciations autorisées (ou, à l'inverse, interdites) entre les variables concernées par cette relation. Elle concerne généralement les variables discrètes.

Elles sont généralement représentées à l'aide de tables de compatibilités (Figure X) qui permettent de montrer sous la forme tabulaire les valeurs autorisées. Par exemple, dans notre problématique, une contrainte liant les conditions d'utilisation de l'hélicoptère et les conditions climatiques et environnementales peut être définie pour caractériser une criticité de l'ambiance de travail du point de vue de la maintenance.

Climat / Environnement	Sévérité d'utilisation	Criticité de l'ambiance
Normal	Normale	Faible
Rude	Normale	Moyenne
Normal	Importante	Moyenne
Rude	Importante	Forte

*Figure X : Exemple de contrainte extensive représentée à l'aide d'une table de compatibilité*

#### III.3.2 Contraintes intensives.

La contrainte intensive (ou en intension) est une relation décrite par une équation (ou inéquation) à l'aide de fonction mathématique. Elle est surtout utilisée pour traiter des variables numériques et plus particulièrement lorsqu'il est difficile voire même impossible de lister toutes les valeurs potentielles d'une variable. On utilise donc des expressions mathématiques pour modéliser des lois physiques ou des résultats d'expériences. Par exemple, la durée théorique de l'intervention de maintenance comprise entre 10 et 2000 heures ( $D_1=[10 ; 2000]$ ) peut être aggravée par un coefficient proportionnel à un risque d'imprévu défini par un expert ( $C_1=[1 ; 1,5]$ ) pour obtenir une durée d'intervention estimée  $D_2= D_1 \times C_1=[10 ; 3000]$ . Cette relation est une contrainte ternaire de type intensive.

#### III.3.3 Contraintes logiques.

Par la suite, il est possible de combiner ces contraintes élémentaires pour construire des contraintes complexes à l'aide de contraintes logiques que l'on rencontre sous la forme d'implications et de déclencheurs logiques (SI ... ALORS ...), de conjonctions (ET logique) ou de disjonctions (OU logique) de contraintes. Ces contraintes sont dites d'activation. Elles permettent de modifier la

structure du problème courant pour y ajouter ou supprimer des variables en fonction d'événements déclencheurs. Elles sont utilisées dans les DCSP<sup>4</sup> [Mittal et Falkenhainer, 1990].

*SI Contraintes\_Utilisation=Forte ET Type\_Hélicoptère=PUMA ALORS Risque\_Crique=Important*

### III.3.4 Arité d'une contrainte.

Une contrainte peut également être classée en fonction de son arité, c'est à dire en fonction du nombre de variables distinctes sur lesquelles elle agit. Nous distinguons les contraintes unaires c'est à dire agissant sur une seule variable (par exemple  $X_1 < 5$ ), les contraintes binaires c'est à dire agissant sur deux variables distinctes (par exemple  $X_1^2 + X_2 > 40$ ) et ainsi de suite jusqu'aux contraintes n-aires ou globales qui agissent sur n variables distinctes.

## III.4. LES DIFFERENTS TYPES DE CSP.

### III.4.1 Les CSP.

Les CSP pour lesquels la structure du problème courant n'est pas modifiable, ont été classés en fonction du type de variables qu'ils utilisent. Ainsi on peut distinguer les CSP discrets, continus et mixtes [Gelle, 1998].

Les CSP discrets n'utilisent que des variables discrètes, ils permettent de faciliter la recherche de solution, quelle que soit la méthode utilisée. De nombreuses applications ne nécessitent que des variables discrètes comme par exemple la gestion des configurations de produits.

Les CSP continus (CCSP<sup>5</sup>) n'utilisent que des variables continues, ils permettent d'intégrer des opérations mathématiques entre les variables dans les CSP mais leur utilisation est limitée aux problèmes exclusivement numériques.

Les CSP mixtes (MCSP<sup>6</sup>) permettent d'utiliser ces deux types de variables. Ils offrent ainsi les avantages des deux modèles précédents et augmentent le nombre de problèmes qu'il est possible de modéliser.

### III.4.2 Les CSP dynamiques

Il existe de nombreuses extensions aux CSP utilisant principalement la base des MCSP et visant à intégrer des fonctions optionnelles c'est à dire des fonctions absentes lors du début de la résolution mais qui, selon les cas, deviennent utilisables durant cette opération. Ces CSP intègrent donc une dimension générative qui à l'avantage d'alléger les phases de propagation (avant l'activation des nouvelles fonctions) et d'utiliser les composants optionnels pour modéliser les problèmes.

Voici une brève description de cinq extensions parmi le panel existant:

- CSP Conditionnels.

Les CSP Conditionnels (CondCSP) définis par [Mittal et Falkenhainer, 1990] sous le nom de Dynamic CSP et revisité et renommé par [Sabin et Freuder, 1998]. Ils permettent des modèles avec des variables inactives en début de résolution qui sont ensuite activées ou inactivées en fonction de variables d'activation.

- CSP Génératifs.

Les CSP Génératifs (GCSP), évolués des CondCSP, ont été introduits par [Stumptner et Haselböck, 1993]. Leur principal avantage réside dans la possibilité de décrire des relations entre les composants du modèle. L'objectif ici étant de rendre la génération de nouveaux composants explicite.

---

<sup>4</sup> Dynamic Constraint Satisfaction Problem

<sup>5</sup> Continuous Constraint Satisfaction Problem

<sup>6</sup> Mixed Constraint Satisfaction Problem

- CSP Composites.

Les CSP Composites (CompCSP) [Sabin et Freuder, 1996] introduisent le principe de méta-variable qui, selon la valeur qui lui est affectée, peut être remplacé par des variables groupées faisant ainsi apparaître un pan complet du problème.

- CSP à états.

Les CSP à états (CSPe) [Véron et Aldanondo, 2000] où chaque variable est associée à un attribut d'état permettant de définir si elle est active ou non. L'avantage de cette méthode réside dans la possibilité d'utiliser les algorithmes classiques sur des variables dynamiques.

- Activity CSP.

Les Activity CSP (ACSP) [Geller et Veksler, 2005] qui utilisent des variables (groupées ou non) auxquelles on associe le concept d'activité au travers d'une variable d'état servant à contrôler la présence des autres variables dans la solution.

### **III.5. RESOLUTION ET FILTRAGE DES CSP.**

Il existe deux manières d'utiliser un CSP: la résolution ou le filtrage. La résolution consiste à trouver une ou toutes les solutions possibles (c'est à dire autorisées par les contraintes) d'un problème. Le filtrage, quant à lui, consiste à réduire les domaines de définition des variables en éliminant les valeurs qui n'apparaissent dans aucune solution.

#### **III.5.1 Résolution des CSP.**

La recherche de solution dans les CSP continus ou mixtes pose de sérieuses difficultés aussi bien en termes de mathématiques que de temps de calcul car il s'agit de parcourir des domaines de définition infinis pour en identifier les éléments. Il est donc impossible de faire une recherche de solution complète et exacte sur ce type de modèle, les résultats sont généralement approchés car obtenus à partir de techniques basées sur la discrétisation des variables continues.

Voici trois algorithmes de recherche classés en fonction de leur efficacité :

- Generate and Test.

L'algorithme « Generate and Test » qui vérifie la validité d'une solution une fois que l'instanciation de toutes les variables est terminée. L'algorithme génère donc toutes les solutions puis les teste et élimine les combinaisons de valeurs ne respectant pas les contraintes. Cette méthode n'est pas exploitable dès que le problème se complique un petit peu car le temps de calcul augmente exponentiellement avec le nombre de variables.

- Backtracking.

L'algorithme « Backtracking » [Golomb et Baumert, 1965] [Bitner et Reingold, 1975] qui se déroule en deux phases : une phase durant laquelle l'algorithme sélectionne les variables les unes après les autres et leur assigne une valeur créant ainsi une solution partielle. Si cette solution partielle respecte les contraintes, on passe à la variable suivante. Sinon l'algorithme revient à la dernière variable instanciée. L'avantage de cet algorithme réside donc dans sa capacité à s'arrêter lorsqu'il détecte une violation de contrainte.

- Backjumping.

L'algorithme « Backjumping » [Stallman et Sussman, 1977] qui est basé sur le backtracking avec une amélioration majeure qui consiste au moment où l'algorithme découvre un problème de violation d'une contrainte à identifier la variable en cause selon une heuristique. Il existe donc plusieurs « backjumping » différents selon l'heuristique utilisée, les plus connus étant le « backjumping » de Gaschnig [Gaschnig, 1979], le « backjumping » basé sur les graphes [Freuder, 1982] [Dechter, 1990] et le « backjumping » dirigé par les conflits [Prosser, 1993].

### III.5.2 Filtrage des CSP.

L'objectif du filtrage ou propagation est de diminuer la taille des domaines de définition des variables par déduction en détectant, grâce à l'utilisation active des contraintes du CSP, les affectations partielles incohérentes.

Comme nous l'avons vu pour la résolution des CSP, le filtrage des variables continues peut se révéler difficile. C'est pourquoi, le filtrage est différent si le CSP concerné est discret ou continu. Nous allons donc commencer par présenter le filtrage sur les CSP discrets puis nous aborderons ce problème pour les CSP continus.

#### ○ Filtrage sur les CSP discrets.

Il existe de nombreuses techniques de filtrage sur les CSP discrets, nous traiterons ici des plus répandues classées en fonction de leur puissance de filtrage. Il faut savoir que plus le filtrage est puissant plus le temps de calcul nécessaire est important. Lors du choix de la méthode de filtrage, il convient donc de définir un compromis entre puissance de filtrage et temps de calcul.

L'arc-cohérente (ou « arc-consistency » en anglais) est un algorithme qui enlève du domaine des variables toutes les valeurs qui ne sont pas cohérentes. Une valeur est cohérente lorsqu'elle possède des valeurs compatibles dans tous les domaines des variables « voisines » (c'est à dire reliées par une contrainte).

La k-cohérence est l'extension de l'arc-cohérence, en effet, l'arc-cohérence correspond à  $k=2$ ,  $k$  représentant donc le nombre de variables servant à vérifier la cohérence des contraintes. Il est à noter que la puissance de filtrage et donc le temps de calcul augmente en fonction de  $k$ .

Une instantiation est dite k-cohérente si elle est (k-1)-cohérente et si on peut trouver une  $k^{\text{ème}}$  variable voisine ayant une valeur compatible. Dans cet exemple (Figure XI), le CSP est arc-cohérent car toutes les valeurs de toutes les variables ont une valeur compatible dans le domaine des variables voisines. Cependant, il n'est pas chemin-cohérent (3-cohérent) car pour un couple de variable (par exemple A et B) il est impossible de trouver valeur compatible dans la troisième variable (C):

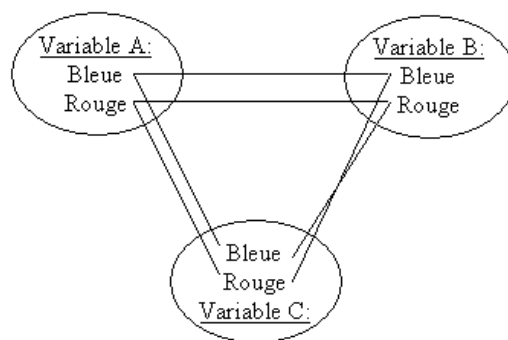


Figure XI: Illustration de l'arc-cohérence et de la chemin-cohérence

Il existe de nombreux autres méthodes de filtrage dont certaines dérivées de la k-cohérence parmi lesquelles l'algorithme de « Restricted Path Consistency » [Berlandier, 1995], l'algorithme de « Max Restricted Path Consistency » [Debruyne et Bessière, 1997] ou encore l'algorithme de « Neighbourhood Inverse Consistency » [Freuder et Elfe, 1996].

#### ○ Filtrage sur les CSP continus.

Parmi les techniques de filtrage sur les CSP continus, les plus répandues sont issues de l'arithmétique des intervalles qui est la base, entre autres, de la 2B-cohérence et de la Box-cohérence.

L'arithmétique des intervalles introduite par [Moore, 1966] qui a défini des notations et des concepts pour étendre le champ d'application des fonctions réelles afin de pouvoir les appliquer aux bornes des intervalles. A partir de ce travail, [Lhomme, 1993] a défini la 2B-cohérence qui est une

approximation de l'arc-cohérence, propre aux CSP discrets, adaptée aux bornes des intervalles. Cependant cette technique impose des limitations sur les fonctions qui doivent être, entre autres, monotones et projetables. C'est pourquoi, [Benhamou et al., 1994] ont introduit la notion de Box-cohérence qui est une autre approximation de l'arc-cohérence pour s'affranchir de ces limitations.

Ces travaux ont également servi de base à la résolution des CSP continus.

## **IV. LE COUPLAGE ENTRE RETOUR D'EXPERIENCE ET CSP.**

Cette partie est principalement basée sur [Squalli et al., 1999], [Marling et al., 2002] et [Ruet, 2002].

### **IV.1. GENERALITES.**

Comme nous l'avons expliqué précédemment, le retour d'expérience est un processus engageant des ressources humaines et techniques. Le CSP est, quant à lui, une technique de résolution de problème. Il n'est donc pas possible de coupler directement ces deux entités, cependant il est possible de coupler les CSP avec le RàPC, c'est à dire la technique de résolution sous-jacente au retour d'expérience. C'est pourquoi, nous ne parlerons ici que du couplage entre CSP et RàPC.

Comme tous les modèles, ces deux techniques ont leurs points forts et leurs faiblesses. L'objectif étant d'utiliser les points forts de l'une pour combler les points faibles de l'autre.

Ainsi l'intégration du RàPC dans un modèle basé sur les CSP permettra d'augmenter, entre autres, l'efficacité de la résolution par contraintes ou la capacité à compléter les modèles lorsque le domaine de connaissance n'est pas maîtrisé ou que le CSP est incomplet. De plus, il est envisageable d'ajouter une fonction d'apprentissage dans le CSP ou de réutiliser des solutions existantes grâce à ce couplage.

Du point de vue du RàPC, l'intégration de techniques issues du CSP permettra de renforcer et de rendre plus rigoureuse la représentation des cas, de développer de manière plus efficace le mécanisme de recherche des cas, d'aider le système à gérer la complexité grâce à la propagation de contrainte, d'intégrer une représentation du contexte sous forme de CSP à la recherche de cas ou encore de faciliter l'exploration de l'espace de solution (c'est à dire de la base de cas).

Le couplage entre le RàPC et le CSP peut donc être utilisé dans de nombreux domaines, mais il convient de définir dans quels cas ce couplage pourra réellement être utile. Sur cette question, [Squalli et al., 1999] propose trois éléments de réponse :

- Les CSP permettent de représenter les tâches comme par exemple l'adaptation dans le RàPC indépendamment du domaine d'application. Cette perspective est très intéressante pour les applications n'ayant pas de domaine attribué.
- Le CBR peut être utile lorsque l'on ne maîtrise pas complètement le domaine ou la connaissance nécessaire à la modélisation du problème.
- Les CSP offrent la possibilité de représenter en détail une tâche pour en améliorer le fonctionnement. Par exemple, une représentation détaillée du contexte, à l'aide des CSP, utilisée lors de la recherche de cas permettra de rendre cette opération du RàPC plus sensible aux variations de contexte.

Malgré un certain nombre d'avantages, le couplage entre RàPC et CSP présente tout de même des inconvénients. Tout d'abord, la complexité de l'intégration de ces deux méthodes à une même application peut poser problème car un tel outil nécessite un nombre important de fonction pour réussir à faire cohabiter les deux approches. La complexité du passage d'une technique à l'autre peut également poser problème.

De plus, le couplage peut introduire les limitations de l'une ou l'autre des méthodes dans l'outil final. Par exemple, le RàPC tend à construire des outils orientés vers un domaine en particulier et cette limitation a tendance à se propager aux outils couplant les deux méthodes [Squalli et al., 1999].

Il y a donc un certain nombre de paramètres à prendre en compte lorsque l'on souhaite construire une application couplant les deux approches car, dans certains cas, ce travail pourra être avantageux mais, dans d'autres configurations, il pourra aussi impliquer une complexité de réalisation accrue. Il faudra donc étudier avec attention les raisons d'un tel couplage et intégrer les limitations, notamment en terme d'espace et de temps, des deux techniques dans la réflexion.

## **IV.2. APPLICATIONS.**

La manière la plus répandue de coupler le RàPC et les CSP consiste à utiliser les CSP lors de l'étape « adaptation » du RàPC. Cependant il existe d'autres systèmes couplant différemment RàPC et CSP notamment en utilisant le RàPC pour initialiser le CSP généralement en limitant l'espace de recherche. Voici donc un aperçu des différentes applications ayant été développées dans ce domaine.

### **IV.2.1 COMPOSER.**

Ce système de résolution des problèmes axé sur la conception de produits configurables, a été proposé par [Purvis et Pu, 1995] [Purvis et Pu, 1996]. Il utilise le RàPC pour présenter à l'utilisateur un nouveau produit en fonction des besoins qu'il a exprimé. Chaque nouveau produit est configuré en fonction de produits similaires précédemment enregistrés dans la base de cas, un produit correspondant donc à un cas. Les cas sont formalisés sur la base des CSP, c'est à dire à l'aide de variables et de contraintes. La description du produit utilise le même CSP mais les valeurs des variables composant ce modèle varient en fonction des cas pour définir des produits.

Lorsque l'utilisateur souhaite configurer un nouveau produit, il définit son besoin en paramétrant un nouveau problème à l'aide de quelques unes des variables du CSP. Ensuite le système recherche des cas similaires dans sa base de cas à partir des variables déjà renseignées par l'utilisateur en utilisant la technique des plus proches voisins. A partir des cas similaires retrouvés, le système formule une solution en regroupant les variables, dont la valeur correspond exactement au problème renseigné par l'utilisateur, les contraintes agissant sur ces variables et toutes les variables utilisées par ces contraintes. De nouvelles variables et contraintes peuvent donc apparaître pour compléter le besoin exprimé par l'utilisateur. On utilise ensuite les techniques de satisfaction de contrainte pour détecter et corriger les incohérences de cette solution et cette solution corrigée est proposée à l'utilisateur.

Le système COMPOSER permet donc de résoudre de nouveaux problèmes de conception en s'appuyant sur des problèmes de conception déjà résolus. Ses principaux avantages résident dans sa capacité à travailler avec des cas partiellement renseignés, il lui est possible de compléter le problème en identifiant les variables et les contraintes manquantes, et l'adaptation des solutions se base sur plusieurs cas passés au lieu d'un seul ce qui évite la perte d'information. Ce système nécessite cependant que les cas soient formulés sous forme d'un CSP utilisant des contraintes bien identifiées ce qui n'est pas applicable à tous les problèmes.

### **IV.2.2 CADRE.**

Le système CADRE (Case Adaptation by Dimensionality REasoning) est un système d'aide à la conception basé sur le raisonnement à partir de cas utilisant les techniques de satisfaction de contraintes pour adapter des cas de conception architecturale dans le secteur du bâtiment [Hua et al., 1996].

Dans ce système, un cas représente un produit fini comprenant toutes les informations dimensionnelles et géométriques d'un bâtiment. Le système permet donc à l'utilisateur de rechercher des cas (bâtiments) similaires dans la base de cas et de les adapter au problème courant. La notion d'intégrité, qui sert à définir les modifications acceptables lors de l'adaptation, est représentée par un ensemble de contraintes correspondant à des relations sur les dimensions à respecter en fonction de la géométrie du bâtiment. Le bâtiment est donc représenté sous la forme d'un CSP modélisant les contraintes géométriques et dimensionnelles de la construction. Le système utilise ensuite un processus « d'analyse dimensionnelle » pour déterminer quelles sont les incohérences (traduites par le non-respect des contraintes) entre le cas retrouvé et le cas courant et ainsi savoir si le problème peut être résolu et sur quelles dimensions agir pour le résoudre. Si le problème est trop contraint et donc

impossible à résoudre, le système offre la possibilité, au travers d'un processus « d'expansion dimensionnelle », d'ajouter de nouvelles variables au problème pour permettre sa résolution.

En ce qui concerne l'adaptation des cas, le système CADRE permet l'utilisation de plusieurs cas qui en les combinant permettent de résoudre le problème courant. Ainsi chaque cas peut représenter une partie du bâtiment. L'adaptation peut se faire de deux manières. L'adaptation « dimensionnelle » qui consiste à agir sur les informations dimensionnelles. L'adaptation « topologique », quant à elle, consiste à modifier la structure du bâtiment, par exemple, en réduisant le nombre de pièces.

Ce système modélise donc les cas sous la forme de CSP contenant les informations spatiales propres à la conception architecturale. Les contraintes, qui expriment les relations entre ces informations, sont utilisées lors de l'adaptation des cas au problème courant. Etant donné que les dimensions à adapter sont identifiées à l'aide du processus « d'analyse dimensionnelle », il n'est pas nécessaire d'adapter le cas dans sa globalité. Les contraintes sont donc simples dans leur forme (relations dimensionnelles) et dans leurs nombres (complexité limitée) ce qui rend ce système difficilement utilisable dans un contexte différent, notamment s'il nécessite l'introduction d'informations textuelles ou plus complexes.

### **IV.2.3 IDIOM.**

Le système IDIOM (Interactive Design using Intelligent Objects and Models) [Smith and al., 1995] [Smith and al., 1996] [Lottaz, 1996] est destiné au même domaine que le système CADRE, à savoir la conception de bâtiment. Il utilise des cas pour modéliser des sous-ensembles de conception, les mémorise et ensuite les réutilise dans les nouvelles conceptions. Son objectif est de permettre de faire de la conception interactive de bâtiment à l'aide d'une bibliothèque de cas représentant une partie d'une conception antérieure. Chaque cas correspond à une pièce et aux éléments à l'intérieur de celle-ci et est décrit à l'aide de variables définissant la position des éléments dans la pièce. Le cas intègre également des informations sur la façon dont peut s'agencer la pièce avec les autres parties du bâtiment, ces informations étant modélisées à l'aide de contraintes.

A partir des préférences définissant le besoin de l'utilisateur, le système IDIOM propose une conception à l'utilisateur en lui montrant l'arrangement des différentes pièces. Pour ce faire, le système utilise les techniques de satisfaction de contraintes pour adapter les cas passés et ainsi construire virtuellement la nouvelle conception. Le couplage entre RàPC et CSP évitent donc à l'utilisateur de recommencer intégralement la conception et lui permet de réutiliser son expérience passée au travers des conceptions mémorisées. Cependant ce système présente les mêmes inconvénients que CADRE surtout dus à l'utilisation de contraintes simples servant exclusivement au positionnement spatial des éléments. Concernant ces outils d'aide à la conception de bâtiment, on peut également citer CADSYN [Maher et Zhang, 1991] [Maher et Zhang, 1993] qui utilise également les CSP pour répondre aux besoins liés à la phase d'adaptation du RàPC.

### **IV.2.4 JULIA.**

Le système JULIA [Hinrichs, 1992] est une application d'aide à la conception dans le domaine de la planification des repas basée sur le raisonnement à partir de cas. Il utilise les CSP pour décrire les cas. Les contraintes sont employées pour décrire les connaissances générales sur la conception de repas (par exemple l'équilibre nutritionnel du repas) et les impératifs du client (par exemple la facilité de réalisation de la recette).

Le système commence donc par rechercher un cas similaire au nouveau problème. Ensuite les contraintes du nouveau problème sont appliquées au cas retrouvé et JULIA recherche la présence de conflits. En cas de conflits, l'application adapte la structure du cas pour qu'elle corresponde à la situation courante et, si cette adaptation ne fonctionne pas et que les conflits persistent, le système relaxe certaines contraintes selon les préférences de l'utilisateur pour proposer une solution valide. C'est donc grâce à ces techniques de propagation et de relaxation de contraintes que cette application réussit à faire de l'adaptation de cas malgré la complexité du domaine.



#### **IV.2.5 CHARADE.**

Le système CHARADE [Avesani et al., 1993] est une application d'aide à la décision dans le domaine des urgences environnementales comme par exemple les feux de forêt. La partie RàPC du système a pour objectif l'évaluation rapide de la situation et la partie CSP offre au système la possibilité de déterminer comment résoudre la situation en fonction des ressources disponibles. La nature même du domaine d'application (les urgences environnementales) impose le choix du RàPC comme base de l'application car c'est un domaine où les informations disponibles sont incomplètes et incertaines. En effet les feux de forêt sont imprévisibles et la stratégie pour les combattre doit donc tenir compte de cette caractéristique.

Le processus de résolution de problème de CHARADE débute par une recherche de cas passés (c'est à dire de planning d'interventions) dans la base de cas. Ensuite l'utilisateur met à jour les informations en modifiant les actions à effectuer ou les contraintes du modèle et le système propage les changements introduits par l'utilisateur. Ce système permet donc d'obtenir des solutions cohérentes malgré l'incertitude du domaine. De plus, il est possible de modifier en temps réel les contraintes du modèle pour réagir en permanence à l'évolution de la situation.

#### **IV.2.6 Test sur l'interopérabilité des protocoles réseaux.**

[Squalli et Freuder, 1998] propose un prototype de recherche destiné à diagnostiquer les problèmes d'interopérabilité sur les protocoles réseaux. Ce prototype utilise le RàPC pour compenser les difficultés sur les CSP dues notamment à des informations incomplètes ou incorrectes. Cette application permet de détecter les problèmes qui se posent lorsque deux dispositifs ou plus sont connectés avec le même protocole à un réseau.

Les tests à effectuer sont décrits sous la forme de CSP à partir des spécifications propres à chaque protocole. Le trafic entre les deux dispositifs est ensuite capturé et comparé grâce au CSP avec les résultats attendus par les spécifications pour découvrir d'éventuelles incohérences. Cependant le modèle de CSP peut être incorrecte ou incomplet, notamment à cause de liaisons avec le monde extérieur ou d'interprétations erronées par l'expert en charge de la modélisation. On utilise donc le RàPC pour compenser ces manquements dans le CSP.

Le RàPC fournit à la base de cas de nouveaux cas utilisables à l'avenir au travers de son processus d'apprentissage. Il est également utilisé pour modifier et mettre à jour le modèle en ajoutant par exemple de nouvelles contraintes pour améliorer l'efficacité du modèle CSP. Il y a de nombreux avantages à ce couplage parmi lesquels la réduction du nombre de cas à retrouver grâce au CSP, le RàPC n'est utilisé qu'en cas de défaillance du CSP qui est bien plus simple à utiliser, l'uniformité de la représentation des cas sous forme de CSP ou encore l'amélioration du modèle CSP à partir des résultats du RàPC.

#### **IV.2.7 CBAR.**

Le système CBAR (Case-Based Advanced Reservation system) [Huang et Miles, 1993] est une application destinée à la réservation de vacances dans les agences de voyages. Elle utilise le raisonnement à partir de cas pour travailler sur des problèmes de satisfaction de contraintes complexes portant sur l'assemblage des produits du voyageur.

Pour travailler, le système dispose de plusieurs sources d'informations. Il existe une base de cas rassemblant les forfaits vacances passés et validés et une base de donnée contenant les différentes vacances disponibles et les règles d'assemblage entre ces vacances. Cette dernière est la principale source de contrainte pour le système. Celui-ci dispose également d'un modèle logique rassemblant l'ensemble des contraintes statiques et d'un ensemble de contraintes dynamiques caractérisant les exigences de la clientèle.

Dans cette application, le RàPC est utilisé pour réduire l'espace de recherche et ainsi faciliter le travail de résolution du CSP. L'expérimentation a montré que la combinaison entre les techniques du RàPC et du CSP permet de réduire sensiblement le nombre de requête faite aux bases de données.

#### **IV.2.8 Conception technique (engineering design).**

Il est également possible d'utiliser les CSP pour réaliser la phase de recherche des cas passés du RàPC dans le domaine de la conception technique [Bilgic et Fox, 1996]. Cette technique permet de décrire le contexte à l'aide de contraintes et de rechercher les cas passés à partir du contexte et des techniques de satisfaction de contraintes.

Cette application est destinée à l'industrie aéronautique et notamment à la conception de pièces complexes. Elle est initialisée à l'aide d'exigences de haut niveau à partir du cahier des charges (exigences fonctionnelles, contraintes, fonction de la pièce, ...) et retrouve les cas passés similaires. Ces conceptions passées servent de guide aux ingénieurs pour réaliser une synthèse de conception qui à son tour déterminera les exigences pour le niveau de conception suivant. Le processus de conception est donc décrit comme un processus d'affinage itératif où chaque niveau rassemble les informations concernant les exigences fonctionnelles du niveau suivant, les cas de conceptions similaires retrouvés et les décisions de conception correspondantes.

Ce projet met donc en avant une méthode de recherche des cas passés intégrant un critère basé sur la similarité du contexte défini à partir de contraintes. Le processus de recherche utilise donc les contraintes et les objectifs comme appartenant explicitement à la requête sur la base de cas plutôt qu'à la base de cas elle-même. Cette technique offre donc une grande souplesse pour la recherche et la sélection des cas passés.

### **V. BILAN DE L'ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.**

Cette étude bibliographique m'a aidé à me familiariser avec les méthodes d'aide à la décision qui vont être utilisées lors des travaux de recherche sur ce lot de travail du projet HELIMaintenance. Cette étude a permis d'introduire les notions nécessaires à mon travail de stage comme le retour d'expérience ou les problèmes de satisfaction de contraintes. Elle a également permis de présenter certaines applications déjà réalisées, utilisant le couplage entre raisonnement à partir de cas et problèmes de satisfaction de problèmes qui va être le principal objectif des travaux de recherche sur ce lot de travail. Quelques pistes ont déjà été évoquées pour réaliser le couplage comme par exemple la diminution de la taille du domaine d'une variable d'un CSP à partir de l'expérience acquise.

## **CHAPITRE 3: TRAVAUX REALISES.**

---

Durant ce projet, trois tâches principales se sont suivies. Dans un premier temps, en parallèle de l'étude bibliographique, il a fallu sensibiliser les industriels aux approches d'aide à la décision, telles que le retour d'expérience et les techniques de satisfaction de contraintes, que nous envisagions d'utiliser par la suite. Ensuite, le but de mon travail a été de modéliser le processus de maintenance en vue d'identifier les axes d'améliorations qu'il serait possible d'outiller avec l'aide à la décision. Pour finir, l'objectif final de mon stage était de mettre en lumière un certain nombre d'axes de recherche potentiels pour la suite du projet.

### **I. SENSIBILISATION AUX APPROCHES UTILISEES.**

La première partie de mon stage a été consacrée, parallèlement à l'étude bibliographique, à la réalisation d'un diaporama expliquant les possibilités en terme d'outils d'aide à la décision qu'offre le lot n°6. Ce diaporama a été utilisé pour informer les industriels et servir de base à une discussion visant à spécifier le besoin de l'entreprise de maintenance. Pour illustrer ce diaporama, nous avons construit un « Toy Problem » destiné à présenter les techniques de satisfaction de contraintes et le processus de retour d'expérience. Ce « Toy Problem » est basé sur l'estimation de la durée du cycle d'une visite de maintenance sur un hélicoptère. Plusieurs paramètres d'entrée potentiels ont été identifiés (Type d'hélicoptère, âge de l'appareil, conditions d'utilisation, ...) pour modéliser et prendre en compte le risque d'imprévu et/ou la charge de l'atelier pour estimer le temps de cycle de la visite de maintenance.

Ce « Toy Problem » a donc été décliné de plusieurs manières pour présenter les différentes méthodes envisagées pour aider la décision en maintenance d'hélicoptères. Nous avons construit deux modèles de connaissances à base de contraintes destinés à estimer le temps de cycle de la visite de maintenance utilisant les variables discrètes seules ou couplant variables discrètes et numériques. Nous avons ensuite adapté ce « Toy Problem » dans un logiciel de résolution de problème par retour d'expérience appelé T-REX dans le cas où l'estimation du temps de cycle ne correspondrait pas à la réalité. Enfin nous avons présenté la possibilité de coupler ces deux approches pour estimer le temps de cycle.

#### **I.1. LES MODELES DE CONNAISSANCES A BASE DE CONTRAINTES.**

L'objectif visé par ces deux modélisations est de pouvoir expliquer le fonctionnement des techniques de satisfaction de contraintes et démontrer les capacités de ce type de modèles. Ceux-ci sont donc volontairement simplifiés et ne reflètent pas la réalité des paramètres nécessaires à l'estimation du cycle de maintenance.

##### **I.1.1 Modèle utilisant des variables discrètes.**

Ce modèle est destiné à estimer le temps de cycle d'une visite de maintenance en fonction d'une durée théorique issue de la documentation constructeur de l'hélicoptère concerné. Le risque d'imprévu est quant à lui fonction de plusieurs paramètres tels que le nombre d'heures de vol ou encore les conditions d'utilisation.

Il utilise des variables discrètes (voir Chapitre 2:III.2.1) liées entre elles par des contraintes extensives sous forme de tables de compatibilité (voir Chapitre 2:III.3.1). Voici la liste des variables de ce modèle ainsi que leurs domaines de définitions :

- Type d'hélicoptère = {Puma, Dauphin, Gazelle}
- Type de visite = {Petite, Moyenne, Grande}
- Durée théorique = {<1mois, Entre 1 et 3 mois, Entre 3 mois et 6 mois}
- Nombre d'heures de vol = {<1000h, entre 1000 et 5000h, >5000h}
- Sévérité d'utilisation = {Normale, Importante}

- Climat / Environnement = {Normal, Rude}
- Criticité de l'ambiance = {Faible, Moyenne, Forte}
- Risque d'imprévu = {Faible, Moyen, Fort}
- Durée estimée de l'intervention = {<1mois, Entre 1 et 3 mois, Entre 3 et 6 mois, >6 mois}

La Figure XII est un exemple de table de compatibilité liant les variables entre elles, ici le type d'hélicoptère (TH), le type de visite (TV) et la durée théorique du cycle de la visite de maintenance (DI). Cette contrainte est construite à partir de la connaissance issue de la documentation constructeur mais il est également possible d'utiliser la connaissance d'un expert pour construire les contraintes.

TH	TV	DI
PUMA	Petite	< 1 mois
DAUPHIN	Petite	< 1 mois
GAZELLE	Petite	< 1 mois
PUMA	Moyenne	< 1 mois
DAUPHIN	Moyenne	Inexistante
GAZELLE	Moyenne	Entre 1 et 3 mois
PUMA	Grande	Entre 3 et 6 mois
DAUPHIN	Grande	Entre 1 et 3 mois
GAZELLE	Grande	Entre 3 et 6 mois

Figure XII : Table de compatibilité représentant une contrainte extensive entre variables discrètes.

La Figure XIII représente le modèle de connaissance complet, les traits noirs symbolisent les contraintes entre les variables. La zone délimitée par des pointillés rouges correspond à la connaissance issue de la documentation constructeur pour définir la durée théorique de l'intervention. La zone délimitée par des pointillés bleus correspond aux informations sur la vie de l'hélicoptère issues du client et de la connaissance de l'expert pour définir le risque d'imprévu. La zone délimitée par des pointillés verts correspond au résultat du modèle obtenu par la connaissance de l'expert, c'est l'estimation de la durée du cycle de maintenance.

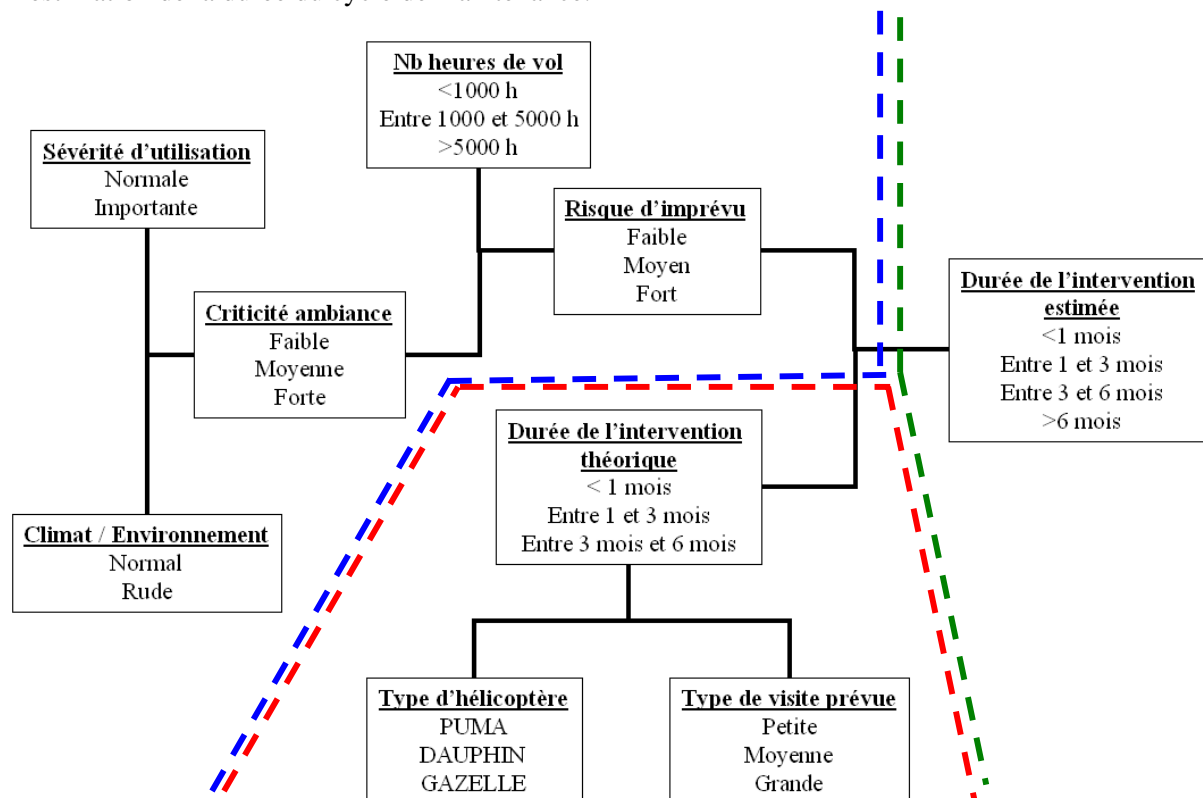


Figure XIII : Modèle à base de contraintes utilisant des variables discrètes.

L'avantage de ce type de modèle réside dans sa simplicité par rapport à un modèle utilisant les variables continues. Il est donc moins gourmand en ressources informatiques que le modèle suivant. Les inconvénients sont un manque de précision et l'impossibilité de faire des calculs entre les variables et donc d'obtenir une estimation chiffrée.

### I.1.2 Modèle couplant les variables discrètes et continues.

Comme la modélisation précédente, ce modèle a pour but d'estimer le temps de cycle d'une visite de maintenance en fonction d'une durée théorique issue de la documentation constructeur et d'un risque d'imprévu mais il inclut également la charge de l'atelier pour obtenir une meilleure estimation.

Ce modèle utilise des variables discrètes couplées à des variables continues (voir Chapitre 2:III.2.2) liées entre elles par des contraintes qui peuvent être extensives, intensives ou logiques (voir Chapitre 2:III.3). Voici la liste des variables de ce modèle, les variables continues figurant en italique :

- Type d'hélicoptère = {Puma, Dauphin, Gazelle, ...}
- Type de visite = {Petite, Moyenne, Grande, ...}
- Nombre d'heure de vol = {<1000h, Entre 1000 et 5000h, >5000h}
- Age de l'appareil = {<5 ans, Entre 5 et 25 ans, >25 ans}
- Sévérité d'utilisation = {Normale, Importante}
- Climat / Environnement = {Normal, Rude}
- Criticité de l'ambiance = {Faible, Moyenne, Forte}
- Risque d'imprévu = {Faible, Moyen, Fort}
- Occupation des ressources techniques = {Libres, Saturées}
- Occupation des ressources humaines = {Libres, Saturées}
- Charge de l'atelier = {Faible, Moyenne, Forte}
- Coefficient multiplicateur 1 (C1) = {[1,1.05], [1.05,1.2], [1.2,1.3]}
- Coefficient multiplicateur 2 (C2) = {[1,1.1], [1.1,1.35], [1.35,1.5]}
- Temps de cycle théorique en heures = [10, 2000]
- Temps de cycle estimé de l'intervention en heures : [10, 3900]

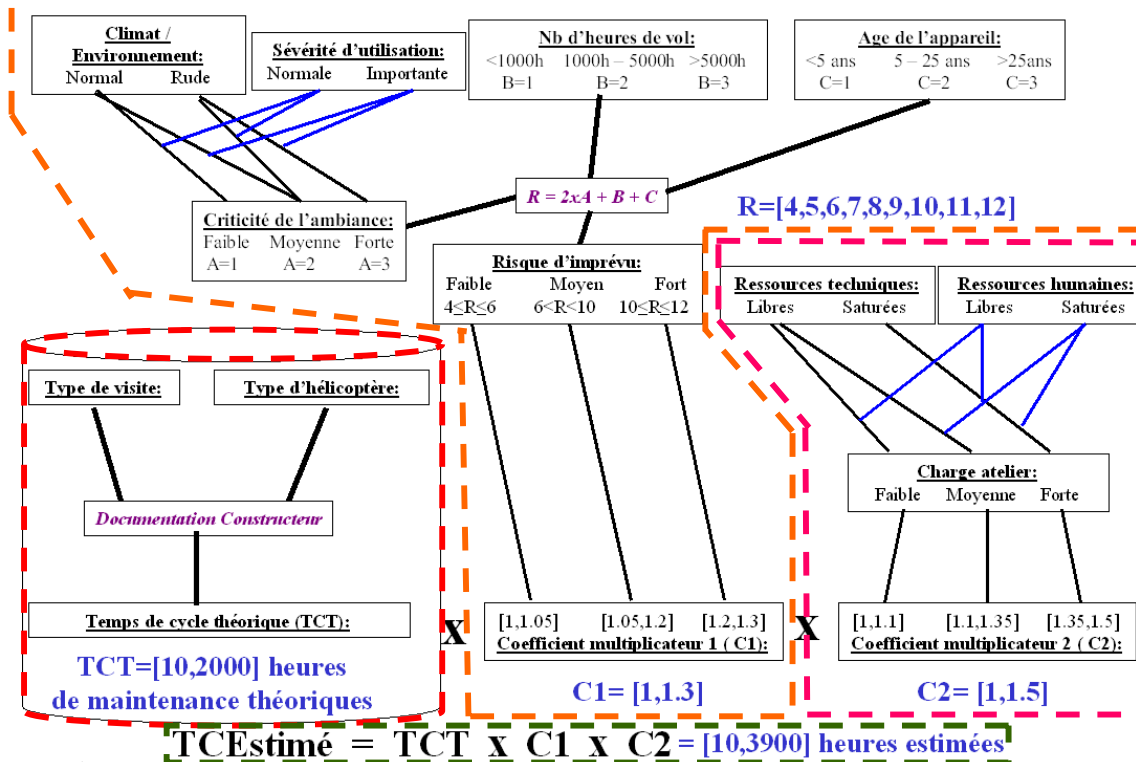


Figure XIV : Modèle à base de contraintes couplant variables discrètes et numériques.

La Figure XIV représente le modèle de connaissance complet, les traits pleins noirs et bleus symbolisant les contraintes entre les variables. La zone délimitée par des pointillés rouges correspond à la connaissance issue de la documentation constructeur pour définir la durée théorique de l'intervention. La zone délimitée par des pointillés oranges correspond aux informations sur la vie de l'hélicoptère issues du client et de la connaissance de l'expert pour définir le risque d'imprévu. La zone délimitée par des pointillés roses correspond aux informations sur la charge de l'atelier issues du chef d'atelier ou du logiciel de planification. Enfin la zone délimitée par des pointillés verts correspond au résultat du modèle obtenu par la connaissance de l'expert, c'est l'estimation de la durée du cycle de maintenance.

Ce type de modèle a pour avantage de pouvoir fournir un résultat chiffré sous forme d'intervalle numérique. Il est également moins restrictif en terme de type de données et plus ressemblant à la réalité que le modèle de connaissance à base de contraintes utilisant uniquement des variables discrètes.

## **I.2. MODELE UTILISANT LE PROCESSUS DE RETOUR D'EXPERIENCE.**

Ce modèle était destiné à fournir un support explicatif du processus de retour d'expérience appliqué à la résolution de problème.

Pour créer ce modèle, nous avons utilisé le logiciel T-REX. Ce logiciel a été développé par le Laboratoire Génie de Production (LGP) de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes pour l'entreprise du secteur ferroviaire ALSTOM. T-Rex est un outil support des processus de résolution de problème et de retour d'expérience fondé sur l'instrumentation d'un processus de résolution de problèmes. Les activités principales dans ces processus sont :

- la formation d'une équipe de résolution de problème,
- la description et l'évaluation de la criticité des événements,
- la caractérisation du problème,
- l'analyse des événements afin d'en rechercher les causes racine et valider cette analyse,
- la proposition d'une solution au problème et son application (solution curative),
- la suggestion d'actions pour éviter une nouvelle occurrence du problème (solution préventive, leçons apprises, etc.).

Il y a plusieurs avantages à utiliser ce logiciel. Tout d'abord, il est possible de structurer le processus de résolution de problèmes en étapes clairement identifiées en utilisant une démarche standard de type 8D ou PDCA. De plus, T-REX met à disposition plusieurs outils facilitant la réalisation des différentes étapes du processus comme par exemple la méthode "est / n'est pas", les "5 pourquoi" ou encore le diagramme d'Ishikawa. Pour finir, il permet également l'utilisation de moteurs permettant la recherche pertinente d'expériences passées (par mots-clés ou par similarité).

Avec l'aide des ingénieurs du Centre de Ressources et de Compétences « Information, Décision, Communication en Entreprise » (CRC-IDCE) du LGP de l'ENIT, nous avons adapté ce logiciel au domaine de la maintenance des hélicoptères notamment au niveau de l'indexation des cas dans la base d'expériences et de l'aspect général de l'interface (Figure XV).

Nous avons ensuite construit un « Toy Problem » basé sur un dépassement du temps de cycle estimé lors d'une visite de maintenance. Pour cela, nous avons créé un nouveau problème dans le logiciel T-REX et nous avons suivi la démarche de résolution de problème 8D proposée par celui-ci en imaginant les causes possibles de notre problème et les actions à mettre en place pour le résoudre. Nous avons essayé de construire ce « Toy Problem » de telle sorte que la résolution utilise le plus possible de fonctionnalités du logiciel telles que l'arbre des causes, le diagramme Ishikawa ou encore la description du problème par la méthode QQQQCP.

Page d'accueil Hide Title

8D : 00006

Utilisateur courant : user1  
login / logout  
FR GB

100% 25% 66% 0% 3% 50% 15% 0% calculer

D0 : PROBLEME D1 : EQUIPE D2 : TREFXD DESCRIPTION D3 : ACTIONS CONSERVATOIRES D4 : ARBRE DES CAUSES D5 - D6 : ACTIONS CORRECTIVES D7 : ACTIONS PREVENTIVES RAPPORT 8D

Enregistrer Éditer le 8D

**Le Problème**

description du problème Le temps de cycle estimé est largement dépassé

service Atelier Mécanique

domaine Part 145

classification oui

date de detection 13 Octobre 2008

reference 806

nom de l'auteur Le Chef

**L'aéronef concerné**

designation PUMA

type aeronef BA

immatriculation 35-806

num de serie 40-6-9

heures de vol 1500h

**Nature des travaux en cours**

visite 100H / 1 an

vidange BTA

travaux supplémentaires prévus Remplacement de la climatisation

Figure XV : Page d'indexation d'un cas dans le logiciel T-REX version HELIMaintenance.

### I.3. PRESENTATION DU COUPLAGE.

L'objectif de cette présentation était de faire comprendre aux industriels les possibilités offertes par le couplage de ces deux méthodes qui constitue le principal intérêt académique sur ce projet.

Il y a plusieurs manières d'envisager le couplage de techniques de satisfaction de contraintes et du processus de retour d'expérience. La plus simple consiste à utiliser les deux techniques en parallèle ou en série (c'est à dire que le résultat de l'un fournit des informations à l'autre).

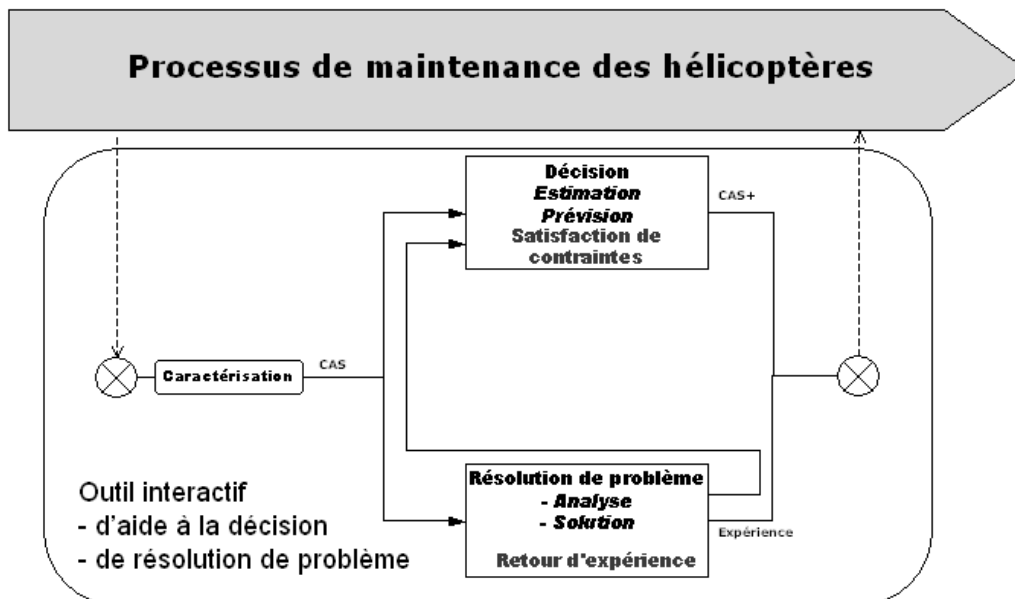


Figure XVI : Illustration du couplage en parallèle et en série.

La Figure XVI présente cette méthode. Nous distinguons ici qu'après avoir caractériser et formalisé le contexte, l'utilisateur choisi le module qu'il souhaite utilisé entre l'aide à la décision et la résolution de problème. A ce stade, il peut lancer en parallèle, les deux processus pour obtenir des résultats différents. Ensuite l'utilisateur peut également utiliser les résultats fournis par l'un des deux processus pour préciser et améliorer les informations que l'on injecte dans le second en vue d'obtenir un résultat plus réaliste. La Figure XVI présente cette deuxième utilisation dans le cas où le processus de résolution de problème alimente le module d'aide à la décision.

Cependant d'autres méthodes de couplage paraissent plus intéressantes d'un point de vue académique. Il est envisageable, par exemple, d'utiliser le retour d'expérience pour générer des connaissances utilisables sous forme de contraintes ou pour vérifier et extraire des contraintes du modèle de connaissances. Le retour d'expérience peut également être utilisé pour « filtrer » les valeurs possibles pour une variable dans un problème de satisfaction de contraintes.

## **II. MODELISATION DU PROCESSUS DE MAINTENANCE.**

Nous avons décidé de modéliser le processus de maintenance pour identifier quelles étaient les actions de ce processus qui nécessitaient une prise de décision. L'objectif était de déterminer, parmi ces décisions, quelles étaient celles qu'il est possible d'assister avec un outil d'aide à la décision. De plus cette modélisation nous a été utile comme support de discussion avec les industriels de la société IXAIRCO.

Nous avons donc commencé par modéliser le vocabulaire du domaine de la maintenance des hélicoptères. Ensuite nous avons choisi le formalisme de modélisation que nous allions utiliser et pour finir nous avons modélisé le processus de maintenance et identifié les décisions qu'il serait possible d'assister avec l'aide à la décision.

### **II.1. MODELISATION DU VOCABULAIRE DU DOMAINE.**

Pour parvenir à une meilleure compréhension des différents éléments intervenant lors du processus de maintenance des hélicoptères et des liens entre ces éléments, nous avons décidé de modéliser le domaine de la maintenance des hélicoptères au travers du vocabulaire le caractérisant.

Nous avons utilisé le langage UML <sup>7</sup> et plus particulièrement le diagramme de classe de ce formalisme. Un des principaux avantages de cette modélisation est la possibilité de définir la multiplicité d'une liaison entre deux classes, c'est à dire le nombre minimum et maximum d'instances de chaque classe dans la relation liant deux ou plusieurs classes. Ce langage permet aussi l'utilisation des notions d'héritage, d'agrégation, de composition et d'association pour décrire les relations entre les classes.

L'annexe 1 présente le résultat de ce travail qui a été corrigé et validé par les industriels. Il a été utilisé comme support de communication en interne et nous a permis d'entrevoir la structure « informatique » du domaine de la maintenance des hélicoptères. Nous remarquons que la classe « Hélicoptère » tient une place centrale dans cette structure car la majorité des autres classes lui sont liée plus ou moins directement. Ensuite nous distinguons cinq classes majeures s'articulant autour de l'« Hélicoptère » : la classe « Ressources », la classe « Visite », la classe « Problème », la classe « Contrat » et enfin la classe « Mission ». Ces classes majeures regroupent chacune plusieurs classes soit par héritage ou par composition. Nous distinguons de plus des classes qui font le lien entre les classes majeures comme par exemple la classe « Métier » qui lie entre autre une « Personne » (c'est à dire une ressource) à une « Activité » (c'est à dire une partie d'une mission).

---

<sup>7</sup> Unified Modeling Language ([http://fr.wikipedia.org/wiki/Unified\\_Modeling\\_Language](http://fr.wikipedia.org/wiki/Unified_Modeling_Language)).



## II.2. CHOIX DU FORMALISME DE MODELISATION.

Dans un premier temps, le formalisme choisi était la technique de modélisation d'ARIS, utilisée par l'éditeur SAP, qui propose un traitement par les EPC<sup>8</sup> pour décrire les processus. Ce choix résultait du fait que ma formation à l'ENIT m'avait amené à employer ce formalisme et qu'il était très simple à comprendre et à utiliser car il n'est constitué que de huit symboles différents que l'on peut relier entre eux par seulement deux types de traits (Figure XVII).

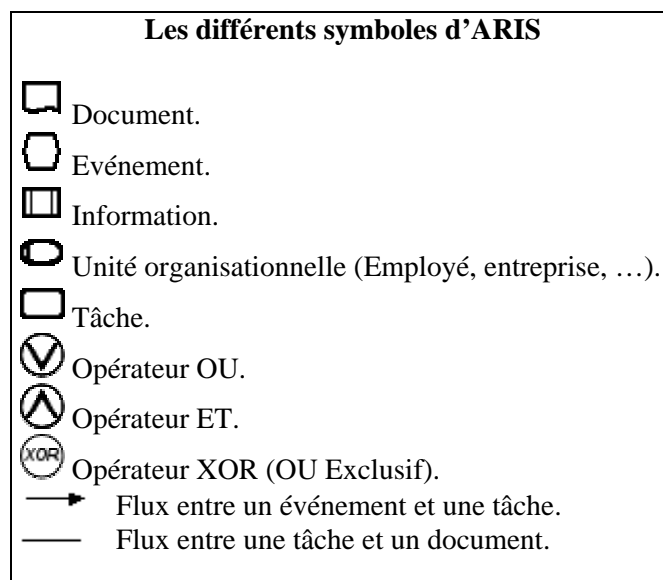


Figure XVII : Les différents symboles du formalisme ARIS.

Cependant ce formalisme ne nous permettait pas de représenter le processus de maintenance tel que nous le souhaitions. Par exemple, il nous était impossible de représenter le fait qu'une tâche puisse être lancée plusieurs fois à intervalles réduits, c'est à dire que la tâche n'est pas encore terminée mais elle est relancée une autre fois avec un autre « jeton » (chaque jeton représentant une ressource qui réalise la tâche).

Notre choix s'est donc porté sur le formalisme BPMN<sup>9</sup> qui nous permettait d'utiliser cette notion de « jeton ». De plus ce formalisme offre la possibilité de créer des sous-processus et de différencier facilement les acteurs intervenants dans le processus. Le principal inconvénient de ce formalisme réside dans le nombre de symboles qu'il utilise pour représenter un processus. Cependant il est très intuitif et la compréhension des différents sigles est très rapide. L'annexe 2 explique le fonctionnement de ce langage.

## II.3. LE PROCESSUS DE MAINTENANCE D'HELICOPTERE.

### II.3.1 Présentation.

L'annexe 3 présente le processus de maintenance tel que nous l'avons modélisé.

Nous avons identifié quatre entités majeures qui jouent un rôle actif dans le processus de maintenance. Il s'agit de l'entreprise de maintenance qui réalise les opérations de maintenance, du client qui demande la maintenance de son hélicoptère, du constructeur qui définit les opérations de maintenance à effectuer sur les appareils qu'il a conçu, et de la DGAC<sup>10</sup> qui permet de déroger

---

<sup>8</sup> Event Process Chain ([http://en.wikipedia.org/wiki/Event-driven\\_process\\_chain](http://en.wikipedia.org/wiki/Event-driven_process_chain)).

<sup>9</sup> Business Process Modelling Notation.

<sup>10</sup> Direction Générale de l'Aviation Civile

ponctuellement à certaines contraintes et qui définit les impératifs en terme de sécurité. Cependant pour simplifier la modélisation et en faciliter la lecture, nous avons choisi de ne pas représenter les activités liées au constructeur et à la DGAC qui n'interviennent que rarement. Au sein de l'entreprise de maintenance, nous avons identifié trois fonctions qui interviennent dans le processus :

- La fonction commerciale qui intervient dans la réalisation du devis et qui fait l'interface avec le client avant la signature du contrat.
- La direction technique qui réalise la partie technique du devis, qui organise et lance les travaux de maintenance et qui s'occupe de la résolution de problème.
- L'atelier de maintenance (ou le technicien s'il est seul) qui réalise les opérations de maintenance et signale les problèmes.

Nous avons représenté le processus à partir de cinq activités majeures qui sont entourées par des couleurs différentes dans l'annexe 3:

- L'activité « Commercial » qui fait intervenir le client et le service commercial. Cette activité regroupe la création d'un devis, la commande du client et les éventuels avenants au contrat. Cette activité est entourée en vert sur la représentation du processus.
- L'activité « Organisation » qui est réalisée par la direction technique. Elle se divise en deux parties : l'organisation initiale et l'organisation journalière. L'organisation initiale correspond aux prévisions faites avant l'arrivée de l'hélicoptère. L'organisation journalière correspond au lancement des travaux et à la réaction face à un imprévu. Cette activité figure en orange sur la représentation du processus.
- L'activité « Réalisation » qui coïncide avec le travail du technicien de travail. Celui-ci, en fonction du travail que lui donne la direction technique, récupère la carte de consigne correspondante, réalise l'opération et, selon le besoin, signale les problèmes. Cette activité est entourée en violet sur la représentation du processus.
- L'activité « Résolution de problème » qui est gérée par la direction technique. Selon la gravité du problème signalé par le technicien de maintenance, celle-ci réalise ou non une analyse et résout le problème. Après cette résolution, l'activité « Organisation » prend le relais pour mettre à jour la gamme de maintenance et ainsi intégrer la solution du problème. Cette activité figure en rouge sur la représentation du processus.
- L'activité « Certification » est faite soit par le technicien soit par la direction technique. En effet, à la fin de chaque opération, celle-ci doit être certifiée par un technicien habilité et lorsque la visite de maintenance est terminée elle doit également être certifiée par une personne habilitée (dans notre cas le directeur technique). Cette activité est entourée en jaune sur la représentation du processus.

### **II.3.2 Identification et positionnement des axes à développer.**

Lors de cette modélisation et des discussions avec les industriels qui ont suivi, nous avons détecté trois axes majeurs qu'il serait possible d'outiller avec une application d'aide à la décision pour améliorer la qualité ou les performances de l'entreprise de maintenance.

Le premier axe concerne la création de devis. Cette opération appartient à l'activité « Commercial » (Chapitre 3:II.3.1) et a été marquée du chiffre 1 entouré dans l'annexe 3.

Cette activité demande une certaine connaissance technique car il faut estimer les opérations qu'il faudra réaliser en tenant compte des imprévus potentiels. Aujourd'hui cette tâche demande un travail considérable car il faut éplucher les éléments fournis sur la vie de l'hélicoptère et la documentation constructeur relative à ce type d'appareil pour chiffrer le coût de maintenance avant de proposer un prix au client. Cette tâche peut occuper le directeur technique pendant plus d'une semaine. Pour réduire ce délai, une des possibilités consiste à informatiser la documentation constructeur pour obtenir automatiquement la liste des opérations à effectuer en fonction de l'appareil. Un outil permettant d'évaluer le risque d'imprévu sur une visite de maintenance aurait également un intérêt certain.

Le deuxième axe concerne l'organisation et la planification d'une visite de maintenance. Cette opération appartient à l'activité « Organisation » (Chapitre 3:II.3.1) et a été marquée du chiffre 2 entouré dans l'annexe 3.

Pour des raisons similaires à la création de devis, l'organisation de la maintenance demande également énormément de temps à la direction technique. Cette durée est la principale conséquence de la taille très importante de la documentation constructeur. Un outil permettant d'obtenir automatiquement la gamme de maintenance permettrait de faciliter le travail du directeur technique et donc d'améliorer les performances de l'entreprise. De plus, si cet outil pouvait assister la planification et tenir compte du risque d'imprévu durant cette opération, la qualité du service de l'entreprise serait meilleure car elle maîtriserait mieux ses délais.

Le troisième axe que nous avons identifié, concerne l'activité « Résolution de problème » (Chapitre 3:II.3.1) et a été marquée du chiffre 3 entouré dans l'annexe 3.

Actuellement lorsqu'un imprévu grave se produit durant une visite de maintenance, le directeur technique en analyse les causes, résout le problème et si nécessaire informe le constructeur pour qu'il puisse intégrer ces informations dans sa démarche de retour d'expérience. Cependant il n'existe aucune capitalisation de l'expérience en interne. Pour éviter de reproduire les erreurs passées et ainsi améliorer la qualité du service de l'entreprise, un outil de résolution de problème utilisant le retour d'expérience tel que T-REX (Chapitre 3:I.2) pourrait être très utile.

Pour finir, les industriels de la société IXAIRCO ont exprimé, lors d'une de nos rencontres, le besoin d'un outil de comptabilité analytique qui capitaliserait les devis et le déroulement en terme de coût des visites de maintenance. Cet outil serait exploité pour diminuer la prise de risque liée à la création d'un devis et pour identifier les incohérences entre les prévisions et le déroulement réel de la maintenance. Il permettrait ainsi de mettre en place des démarches d'amélioration continue destinée à diminuer les coûts ou les délais et à améliorer la qualité du service.

### **III. DESCRIPTION DES AXES DE RECHERCHE POTENTIELS.**

Les différents thèmes de recherche présentés ici correspondent aux propositions que nous faisons suite à la modélisation du processus de maintenance. Celle-ci nous a permis d'identifier des décisions que nous pourrions assister de façon à améliorer la qualité et les performances de la maintenance des hélicoptères. Ces thèmes résultent donc de nos constations sur le fonctionnement de l'entreprise mais également des besoins exprimés par les responsables de la société IXAIRCO lors de nos interviews.

La Figure XX illustre les différents outils qui sont proposés par la suite.

#### **III.1. MODELISATION DU PROGRAMME RECOMMANDE D'ENTRETIEN.**

##### **III.1.1 Introduction.**

Le Programme Recommandé d'Entretien (PRE) est un document contenu dans la documentation constructeur d'un type d'appareil. C'est, en quelque sorte, le sommaire du manuel d'entretien pour ce type d'appareil. Il regroupe les informations concernant le contenu et la périodicité des visites de maintenance. Ainsi ce document indique pour une visite donnée toutes les opérations à effectuer. Les visites sont définies par de nombreux critères tels que, par exemple, le nombre d'heures de vol (par exemple toutes les 500h de vol), le nombre d'années de fonctionnement (par exemple tous les ans) ou le nombre de cycles de fonctionnement (par exemple tous les 1200 cycles). Il existe aussi des critères liés aux options installées sur l'appareil et à l'utilisation de l'appareil, ainsi le fait d'avoir pratiqué le survol marin ou d'avoir installé un treuil de levage, servira à définir un certain nombre d'opérations complémentaires.

Le PRE est donc très utilisé pour définir la gamme de maintenance pour un appareil qui va arriver en maintenance. Il fournit la liste des opérations à effectuer durant la visite avec, pour chaque

opération, la référence de la carte de consigne correspondante dans le manuel d'entretien. La carte de consigne contient toutes les informations nécessaires à la réalisation des actions à effectuer dans l'opération de maintenance, ainsi que la liste des outillages et des pièces de rechange nécessaires.

Le directeur technique, lorsqu'il doit prévoir l'arrivée en maintenance d'un hélicoptère, réalise la gamme de maintenance à partir du PRE et des éléments fournis par le client sur la vie de l'appareil et ses conditions d'utilisation. Cette opération de planification peut durer plus d'une semaine selon la complexité de la visite à effectuer et la vie de l'appareil. Nous proposons donc de modéliser le PRE pour obtenir un outil d'aide à la décision permettant d'assister cette opération.

### **III.1.2 Description de l'outil envisagé.**

L'outil envisagé a pour objectif de modéliser le PRE pour obtenir une gamme de maintenance générique regroupant l'intégralité des opérations liées aux visites de maintenance, aux options potentiellement installées sur l'appareil et aux conditions d'utilisation dans lesquelles l'appareil peut évoluer.

Cet outil pourra fournir le Plan d'Entretien (PE) particularisé à un appareil donné si on lui fournit les options installées sur l'hélicoptère et ses conditions d'utilisation. Ce document peut être utile si l'entreprise de maintenance a des contrats concernant la maintenance d'hélicoptères sur plusieurs années. Il pourra également fournir la gamme de maintenance particularisée à un appareil, avec les informations nécessaires à la définition du PE, et à une visite si on sélectionne la visite concernée parmi la liste des visites possibles.

Il est également prévu d'introduire la connaissance des experts dans le modèle générique. Cette connaissance pourrait, dans le second cas d'utilisation, permettre à cet outil d'effectuer la planification des tâches si le modèle générique est renseigné par les techniciens, donc les experts, sur la durée estimée de chacune des tâches de maintenance. Il est également envisagé d'utiliser cette connaissance et les marges prévues dans le PRE concernant les dates de réalisation de chaque activité. L'outil pourrait ainsi aider la décision lorsque la gamme de maintenance doit être adaptée. Cette fonctionnalité pourrait être très intéressante pour les cas où la date de la prochaine visite de maintenance est ultérieure à la date où un équipement très coûteux doit être maintenu. Par exemple, le moteur de l'appareil doit être remplacé dans 20 heures de vol et la prochaine visite est prévue dans 50 heures, il convient donc de faire un choix en fonction des marges sur les différentes opérations pour savoir si l'on avance la prochaine visite, si l'on attend la prochaine visite pour changer le moteur ou encore si l'on fait revenir l'appareil deux fois pour chacune des opérations.

Une des contraintes de conception qui a d'ores et déjà été identifiée concerne la nécessité de pouvoir prendre en compte les mises à jour de la documentation constructeur pour que le modèle générique soit en permanence à jour. Il faut donc prévoir la possibilité pour l'utilisateur de modifier facilement le modèle de gamme de maintenance générique.

### **III.1.3 Mise en œuvre envisagée.**

Pour réaliser cet outil, nous envisageons d'utiliser les problèmes de satisfaction de contraintes pour modéliser la gamme générique. Cette technique permettrait d'obtenir des résultats par propagation de contraintes malgré l'absence de certaines informations. Ainsi l'outil fournira le PE si l'on renseigne les informations concernant les options et les conditions d'utilisation sans fournir de renseignements concernant la visite de maintenance.

En ce qui concerne la partie « planification » de cet outil, nous pensons utiliser le processus de retour d'expérience pour capitaliser la planification prévue et le chemin critique défini par l'outil, ainsi que le déroulement réel de la visite de maintenance. En cas de différence importante entre le réel et le prévu, une analyse serait effectuée pour être réutilisée lors de la planification d'une visite similaire.

Ce processus de retour d'expérience permettra également d'identifier les irrégularités dans le fonctionnement de l'entreprise mais aussi dans le modèle générique de la gamme de maintenance. Comme, par exemple, dans les cas où la durée prévue pour effectuer une opération dans le modèle générique est largement supérieure à la durée réelle. Cette fonctionnalité nécessitera donc un couplage entre le processus de retour d'expérience et les problèmes de satisfaction de contraintes.

### **III.1.4 Intérêt industriel.**

L'intérêt pour l'entreprise est d'avoir un outil pour l'aide quotidienne à la maintenance avec l'automatisation de connaissances routinières ce qui permettrait de gagner énormément de temps car la tâche de planification est extrêmement lourde (en moyenne une semaine de travail pour une personne). De plus, l'intégration des connaissances de l'expert, permettrait d'augmenter l'efficacité de l'outil pour prendre en compte des facteurs ne figurant dans le PRE.

Cet outil pourra également être utilisé pour aider la création de devis en estimant rapidement le temps et les fournitures nécessaires à la visite de maintenance à partir de données incomplètes. Ainsi la prise de risque liée à la création d'un prix serait diminuée par une meilleure estimation du coût de la visite.

La partie « planification » réalisée à l'aide du retour d'expérience permet également d'envisager une démarche d'amélioration continue si l'analyse de la différence entre le prévu et le réel révèle des irrégularités dans le fonctionnement de l'entreprise ou du modèle générique de la gamme de maintenance.

## **III.2. OUTIL DE COMPTABILITE ANALYTIQUE.**

### **III.2.1 Introduction.**

La comptabilité analytique (aussi appelée comptabilité de gestion) est un outil destiné à évaluer les coûts réels générés au sein d'une organisation. L'objectif de cette méthode est d'analyser le coût de revient, dans notre cas, d'une visite de maintenance pour obtenir le coût minimal d'une telle opération. La comptabilité analytique s'intéresse donc aux différentes composantes du coût de revient qui, dans le domaine de la maintenance, est principalement composé du coût de production (coût de maintenance) et du coût d'achat des approvisionnements (outillages, rechanges et matières premières).

L'objectif de la comptabilité analytique est donc de justifier le prix de vente d'une opération de maintenance pour réaliser un devis par exemple. Elle permet également d'aider à la prise de décision opérationnelle notamment pour définir des axes d'amélioration de l'entreprise ou pour définir les conditions d'utilisation de la sous-traitance ou d'acceptation d'une commande. Enfin elle permet de contrôler à posteriori les écarts entre les prévisions et les réalisations en analysant les connaissances extraites de l'enregistrement des flux internes et de la description du processus de transformation des biens et services depuis leur entrée jusqu'à leur sortie de l'entreprise.

### **III.2.2 Description de l'outil envisagé.**

L'outil envisagé consiste, d'une part, en une capitalisation des devis très détaillée reprenant tous les éléments prévus pour estimer le coût de l'intervention concernée par le devis (ressources humaines et techniques, fournitures, rechanges, ...). D'autre part, l'outil capitalisera le déroulement réel de l'intervention avec toutes les ressources consommées pour obtenir une comptabilité très détaillée de chaque intervention.

Par la suite, tous les éléments capitalisés dans cette base de connaissances seront exploités de plusieurs manières différentes. La première consistera en une amélioration de l'estimation des coûts pour la constitution d'un devis en fonction des coûts réels des interventions passées similaires à l'intervention concernée par le devis. Un autre moyen d'exploiter la base de connaissances consistera

en une détection des défaillances. Lorsque la différence entre le coût prévu et le coût réel est trop importante, une analyse sera faite pour identifier la source de cet écart et corriger l'estimation ou le processus de maintenance. Pour finir une autre façon d'utiliser cet outil sera d'analyser la partie "coûts réels" de la base de connaissance pour identifier les principaux postes de dépenses et ainsi identifier les axes d'amélioration possibles pour diminuer les coûts de la maintenance.

### III.2.3 Mise en œuvre envisagée.

Pour réaliser cet outil, le processus de retour d'expérience servira de base. En effet, il permettra une capitalisation et une exploitation des connaissances. En ce qui concerne la formalisation de ces connaissances, il y a plusieurs possibilités envisageables. Parmi elles, la modélisation du devis générique et du bilan comptable générique sous la forme de problèmes de satisfaction de contraintes pourrait être une piste intéressante.

### III.2.4 Intérêt industriel.

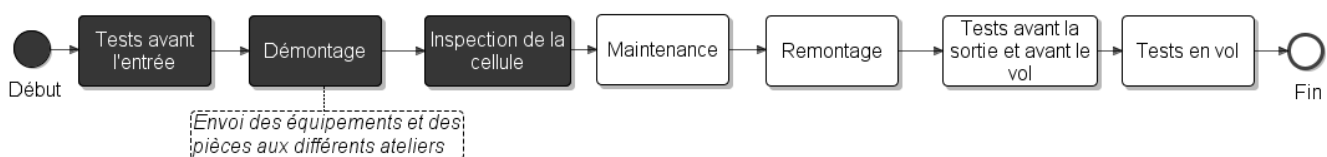
L'intérêt principal pour l'entreprise est la maîtrise des coûts qui lui permettra de toujours proposer le juste prix à ses clients. Cet outil pourra donc être utilisé pour faciliter la création de devis et donc accélérer la négociation de contrat avec un client tout en diminuant la prise de risque liée à toute proposition de prix car l'entreprise possède une meilleure estimation de sa capacité en terme de coût.

Une autre utilisation envisageable de cet outil consistera en une démarche d'amélioration continue aussi bien des estimations lors d'un devis que du processus de maintenance avec l'identification des opérations à risques ou des opérations pouvant potentiellement être améliorées.

## III.3. MODELISATION DU RISQUE D'IMPREVU.

### III.3.1 Introduction.

La maintenance aéronautique, en général, et la maintenance des hélicoptères sont particulièrement vulnérables à la survenue d'événements imprévus malgré la fréquence élevée de ce type d'événement. En effet, le principe même de ce genre de maintenance réside dans la vérification, c'est à dire qu'une visite de maintenance est constituée d'une suite de points à contrôler sur l'appareil avec quelques pièces dont le changement est prévu par la gamme. Cependant, la majorité des changements de pièces se fait en fonction du résultat des différents contrôles effectués sur l'hélicoptère. Voici le déroulement global d'une visite de maintenance complète avec en foncé les actions qui permettent de lever l'incertitude sur le contenu de la visite de maintenance et en clair la visite de maintenance en elle-même (Figure XVIII).



*Figure XVIII : Déroulement d'une visite de maintenance.*

La notion d'imprévu est donc prépondérante dans le processus de maintenance car en fonction de l'état de l'appareil la durée du cycle de maintenance peut varier du simple au triple.

Cependant un expert dans la maintenance des hélicoptères peut évaluer ce risque d'imprévu en fonction d'un certain nombre de critères parmi lesquels nous remarquons, entre autre, l'âge de l'appareil, son nombre d'heure de vol, ses conditions d'utilisation (survol marin, ...) ou encore la

qualité du pilotage. Par exemple, un hélicoptère évoluant en milieu marin présente un risque important de corrosion.

### **III.3.2 Description de l'outil envisagé.**

L'outil envisagé permettra de fournir une évaluation du risque d'imprévu sur un hélicoptère et/ou une visite donnée en fonction de plusieurs paramètres renseignés par l'utilisateur. Il pourra prendre plusieurs formes selon la façon dont il sera mis en œuvre.

Il est également envisagé une localisation du risque d'imprévu dans la géographie de l'hélicoptère. Par exemple, si la gamme de maintenance prévoit de travailler sur une zone donnée de l'appareil, le risque d'imprévu variera en fonction de la fragilité des éléments à proximité de l'opération à réaliser pour prendre en compte la survenue d'incidents dus à une maladresse ou à une erreur du technicien en charge de la maintenance. L'outil pourrait également annoter la gamme de maintenance pour signaler au technicien de maintenance la présence d'une pièce fragile à proximité de l'opération qu'il doit réaliser et ainsi diminuer le risque de survenue de l'incident.

### **III.3.3 Mise en œuvre envisagée.**

Plusieurs mises en œuvre différentes sont envisagées pour cet outil et chacune influencera la forme que prendra l'outil. Les pistes évoquées pour réaliser ce système se basent sur les CSP, le retour d'expérience ou le couplage de ces deux méthodes.

Le premier moyen de mise en œuvre consistera en la création d'un modèle de connaissance avec la technique des problèmes de satisfaction de contraintes. L'objectif étant de modéliser la connaissance d'un expert dans le domaine de la maintenance des hélicoptères. Ce système fournirait une évaluation du risque sous forme d'intervalle numérique, cet intervalle se réduisant en fonction des renseignements fournis par l'utilisateur. L'avantage de cette méthode serait la possibilité de fournir un résultat même si toutes les données ne sont pas connues. L'inconvénient majeur résidera dans l'existence d'un seuil de renseignement nécessaire pour fournir un résultat utilisable.

La seconde méthode de mise en œuvre utilisera le processus de retour d'expérience pour évaluer le risque d'imprévu. La difficulté majeure de cette méthode sera d'évaluer la quantité et la gravité des imprévus survenus lors d'une visite de maintenance pour pouvoir capitaliser cette expérience. Chaque expérience sera composée d'une série de paramètres servant à la caractériser et d'une évaluation des imprévus survenus durant la maintenance. L'utilisateur, lorsqu'il souhaitera connaître le risque d'imprévu pour une prochaine visite de maintenance, renseignera les paramètres et obtiendra un retour de toutes les expériences similaires avec le niveau réel d'imprévu. L'outil lui proposera ainsi une évaluation du risque d'imprévu. Cette méthode permettra également d'analyser les facteurs influents sur les imprévus pour avoir une meilleure connaissance de ce phénomène.

La troisième et dernière méthode de mise en œuvre sera dérivée de la première. Un modèle de connaissance utilisant les CSP servira à évaluer le risque d'imprévu. Il sera complété par un processus de retour d'expérience qui capitalisera l'évaluation du risque et le niveau réel de survenue des imprévus. Cette base de connaissance ainsi constituée sera utilisée pour remettre en cause les contraintes si l'on constate des incohérences entre le prévu et le réel. La base de connaissance pourrait également être utilisée pour réduire le domaine de certaines variables du CSP en fonction de l'expérience capitalisée, ce serait donc une sorte de filtrage par retour d'expérience. L'inconvénient d'une telle utilisation de la base de connaissance c'est qu'il faut un nombre d'expériences concordantes suffisant pour influencer le modèle de connaissance. C'est donc une forme de retour d'expérience statistique qui est plus difficilement applicable à notre problème du fait du nombre limité d'interventions chaque année.

### **III.3.4 Intérêt industriel.**

Le principal intérêt de cet outil pour l'entreprise réside dans la maîtrise accrue de son processus de maintenance par une meilleure prise en compte des risques d'imprévu. Une utilisation envisageable sera l'aide à la création de devis. En effet, si la personne en charge de la rédaction du devis dispose d'une évaluation du risque d'imprévu sur l'opération qu'il est en train de chiffrer, il pourra ajuster le prix et les délais en conséquence et ainsi diminuer le risque pris lors de la proposition d'un prix.

Une autre utilisation sera l'aide à la planification qui permettra au responsable de l'atelier de prévoir les marges adéquates pour réaliser la maintenance d'un hélicoptère et surveiller plus particulièrement la visite concernée pour disposer d'une meilleure réactivité et ainsi appliquer le proverbe "une personne avertie en vaut deux".

Une autre utilisation possible avec la localisation du risque sera d'émettre des recommandations distribuées avec les cartes de consignes aux techniciens de maintenance pour leur signaler la présence d'une pièce fragile à proximité de l'opération qu'il doit effectuer ou lui demander d'accentuer son inspection sur un point particulier car il y a un risque non négligeable de découvrir un problème.

## **III.4. OUTIL D'AIDE A LA RESOLUTION DE PROBLEME.**

### **III.4.1 Introduction.**

Comme nous l'avons évoqué lorsque nous avons abordé le processus de maintenance (Chapitre 3:II.3.2), la société IXAIRCO ne capitalise pas son expérience même pour éviter de reproduire ses erreurs. Bien sur le directeur technique, lorsqu'il résout un problème, se souvient de la manière dont il a résolu un problème similaire quelques mois plus tôt, cette expérience n'est pas formalisée et ni capitalisée par l'entreprise. Ainsi si le directeur technique est absent au moment où survient le problème, l'expérience est inaccessible. La résolution du problème prendra donc plus de temps ce qui engendrera une perte pour la société. Pourtant, lorsque le problème est suffisamment grave, il est formalisé et envoyé au constructeur qui l'intègre à sa propre base de connaissance et à son processus de retour d'expérience (voir le Chapitre 2:II).

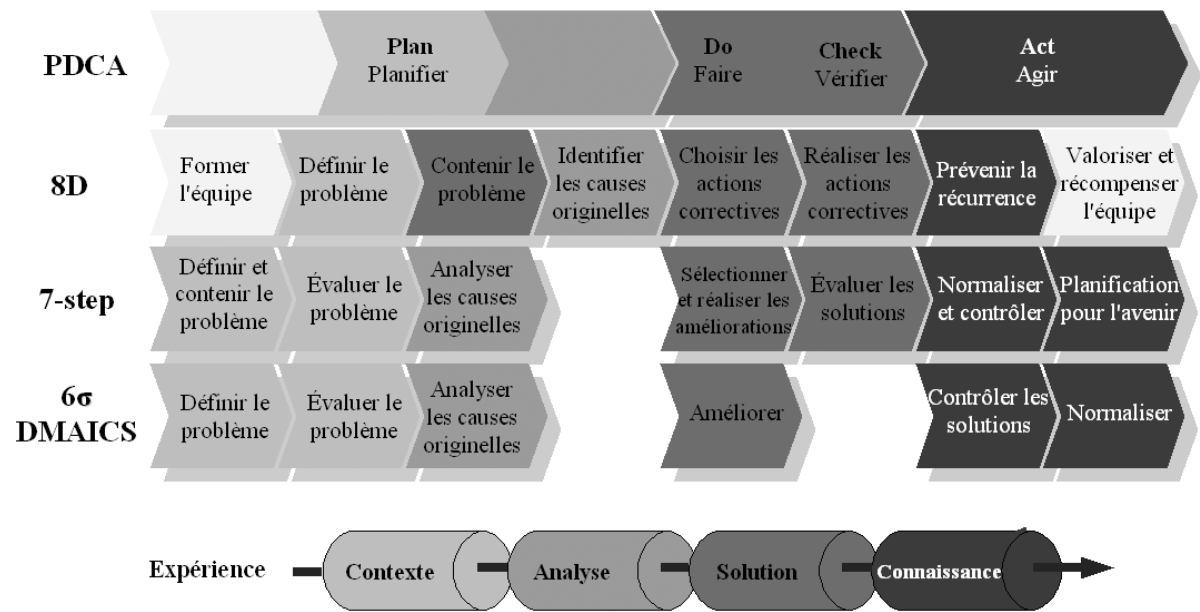
### **III.4.2 Description de l'outil envisagé et de sa mise en œuvre.**

Le principe de l'outil que nous envisageons, est donc de capitaliser les problèmes, leurs solutions et les méthodes utilisées pour les résoudre dans une base d'expérience. Ensuite lorsqu'un nouveau problème se présente, la base d'expérience est exploitée pour découvrir un (ou des) problème(s) similaire(s). A partir de ces expériences retrouvées, la méthode de résolution et/ou la solution sont adaptées pour correspondre au problème courant.

Il existe déjà des logiciels pour réaliser ce retour d'expérience. Parmi eux, l'application T-Rex, présentée dans le Chapitre 3:I.2, modifiée pour s'adapter au domaine de la maintenance des hélicoptères correspondrait parfaitement au besoin évoqué ici. La formalisation du processus de résolution de problème selon une méthode précédemment définie telle que 8D ou PDCA (Figure XIX) permettrait de faciliter la recherche de cas passé tout en optimisant l'efficacité de la résolution du problème.

Par la suite, nous projetons de développer un module qui à partir des cas retrouvés proposerait une nouvelle gamme de maintenance prenant en compte les opérations à réaliser pour résoudre le problème. Plusieurs pistes sont possibles pour réaliser cette dernière fonctionnalité, dont certaines utilisant les techniques de satisfaction de contraintes pour modéliser la gamme de maintenance. Cela permettrait de travailler sur le couplage entre les deux techniques qui semble offrir beaucoup d'intérêt d'un point de vue académique.





*Figure XIX : Les méthodes de résolution de problème.*

### III.4.3 Intérêt industriel.

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'intérêt d'un tel outil pour une entreprise est tout d'abord d'éviter qu'un problème ne se reproduise et ensuite de diminuer le temps passé à résoudre des problèmes en utilisant l'expérience précédemment acquise. De plus, un tel outil obligerait l'utilisateur à utiliser une méthode de résolution de problème formalisée favorisant ainsi l'efficacité de la recherche de solution.

Un autre avantage réside dans le fait que l'outil faciliterait les démarches d'amélioration continue en favorisant l'analyse des causes des problèmes et en mettant en évidence les causes répétitives qui minent la performance de l'entreprise. Ces démarches permettent d'améliorer la qualité du service de l'entreprise et ses performances en réduisant les coûts liés aux imperfections du processus de maintenance.

La fonctionnalité qui construirait une nouvelle gamme de maintenance à partir des expériences retrouvées permettrait à la société de gagner du temps et rentre elle aussi dans l'objectif global du projet HELIMaintenance qui est de réduire de 30% le coût de la maintenance d'un hélicoptère.

### III.5. STRUCTURE GENERALE.

L'avantage des différents outils proposés ci-dessus réside dans le fait qu'ils sont réalisables séparément. Il est donc possible pour l'entreprise de choisir quels sont les outils les plus utiles pour faciliter le travail des personnes travaillant dans le domaine de la maintenance des hélicoptères. Cependant un autre avantage non négligeable de ces différents systèmes réside dans la possibilité d'utiliser une base commune. Cette possibilité permet d'envisager une réalisation échelonnée des outils pour répondre à l'évolution des besoins et aux problèmes de financement de l'entreprise cliente.

La Figure XX montre une première ébauche de la structure que pourrait prendre un outil d'aide à la décision global regroupant les quatre axes précédemment évoqués qu'il faudra affiner au fil du projet. Il permettrait d'assister l'entreprise pour la création des plans d'entretien, des gammes de maintenance, des plans de maintenance et des devis mais aussi pour faciliter et améliorer le processus de maintenance avec la résolution de problème et la comptabilité analytique.

Pour fonctionner, Les bases de connaissances de ce modèle, renseignées par le suivi journalier de la maintenance, utiliseraient trois types de connaissances différents :

- la connaissance issue du constructeur au travers du PRE<sup>11</sup>.
- la connaissance issue de la vie de l'hélicoptère.
- la connaissance issue de l'expérience de l'entreprise de maintenance en termes de coûts, de temps et de fonctionnement opérationnel.

Il permettrait donc de fournir plusieurs documents différents. En premier lieu, nous retrouvons le plan d'entretien (PE) qui correspond au PRE particularisé par rapport à un hélicoptère. Il est suivi de la gamme de maintenance qui correspond au PE personnalisé pour une visite de maintenance. Nous remarquons ensuite le plan de maintenance qui est le résultat de la planification de cette gamme.

Il faut également ajouter à cela, la création de devis réalisée à partir de la gamme de maintenance, de la connaissance sur les coûts et de l'estimation de l'imprévu, et le bilan comptable extrait de la base de connaissances sur les coûts.

Pour finir, le processus de résolution de problème par retour d'expérience alimenté et alimentant une base de connaissances sur le fonctionnement opérationnel de l'entreprise. Bien sur, toute ses informations sont communiquées au niveau opérationnel pour organiser et réaliser le processus de maintenance.

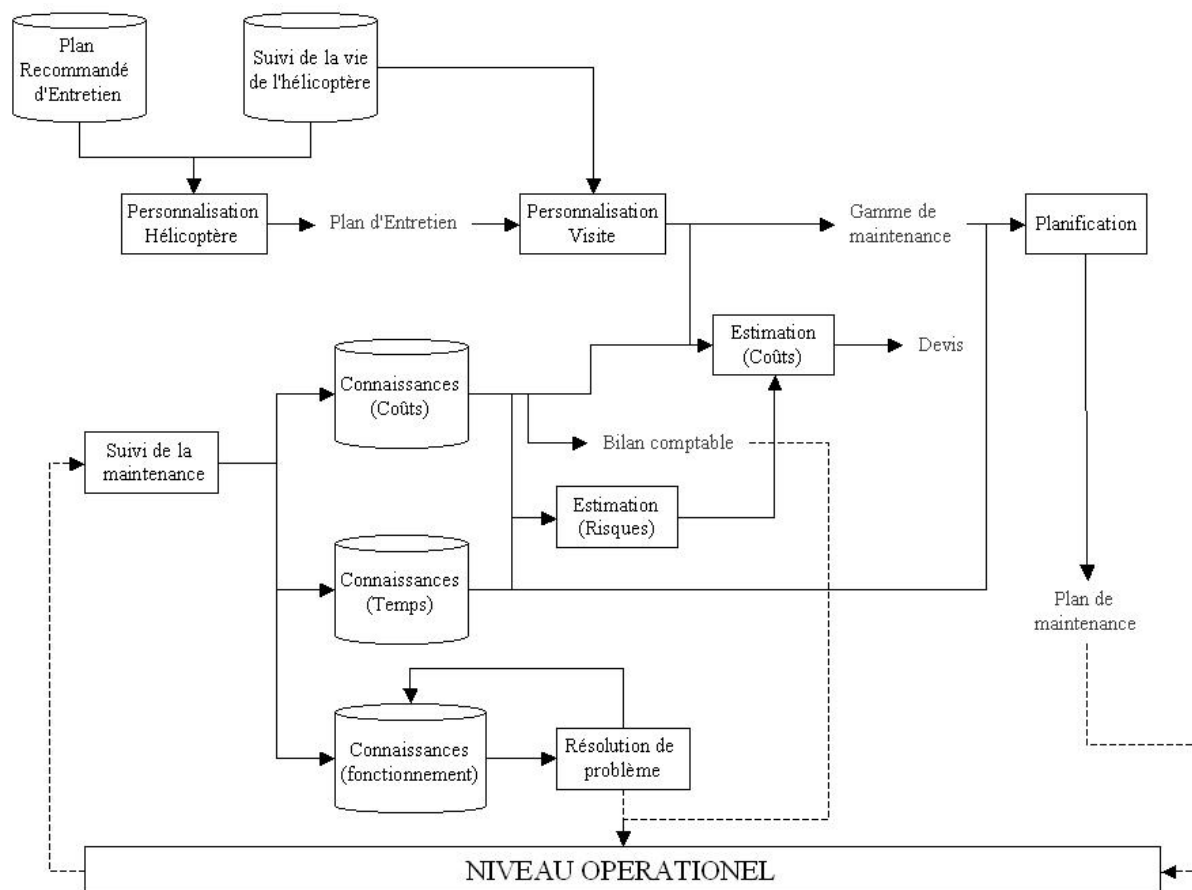


Figure XX : Structure globale des outils d'aide à la décision envisageables.

La structure commune à ces outils s'articule autour d'une page de renseignements que doit remplir l'utilisateur lorsqu'il souhaite utiliser l'un des différents outils. Ce concept vient du fait que les données nécessaires à chaque système pour travailler sont quasiment les mêmes pour tous les outils.

---

<sup>11</sup> Plan Recommandé d'Entretien.

Ils peuvent s'organiser autour de plusieurs thèmes tels que l'hélicoptère (âge, utilisation, ...), le client (nom, activité, ...) ou encore l'opération de maintenance.

L'annexe 4 correspond au cahier des charges que nous avons réalisé pour modifier l'interface du logiciel T-REX afin de l'adapter au domaine de la maintenance des hélicoptères. Ce document offre un bon exemple de ce que pourrait être cette page de renseignements.

### **III.6. INTERET ACADEMIQUE.**

D'un point de vue académique, on peut discerner trois centres d'intérêts aux différents outils qui sont présentés précédemment. Le premier concerne la constitution d'un modèle de connaissances complexe utilisant les techniques de satisfaction de contraintes. En effet, la constitution d'un tel système pour modéliser une gamme générique de maintenance ou encore un devis générique est un excellent moyen d'instrumenter ces techniques dont l'utilisation reste, pour le moment, peu présente dans les applications industrielles.

Le second centre d'intérêt académique concerne l'automatisation de la partie « adaptation » du processus de retour d'expérience, notamment pour l'application d'aide à la résolution de problèmes. En effet, malgré les nombreuses recherches effectuées sur le raisonnement à partir de cas, peu de résultats appliqués adaptent automatiquement les cas retrouvés au cas courant. C'est pourquoi, les travaux de ce type ont une utilité certaine.

Pour finir, le centre d'intérêt qui semble le plus ouvert et donc le plus intéressant concerne le couplage entre le processus de retour d'expérience et un modèle de connaissances utilisant les techniques de satisfaction de contraintes. Ce domaine peu exploré et encore moins appliqué industriellement offre un large panel de possibilités parmi lesquelles se distingue, entre autre, la modélisation des expériences sous forme de problèmes de satisfaction de contraintes ou encore le filtrage des domaines de variable d'un CSP par retour d'expérience.

La majorité des applications envisagées précédemment, conjugue deux de ces centres d'intérêts ce qui offre une certaine crédibilité au travail de recherche qui sera effectué par la suite quels que soient les outils qui seront choisis pour poursuivre ce projet.

## CONCLUSION.

---

Ce mémoire est issu du travail que j'ai effectué durant mon stage de Master Recherche au sein du Centre Génie Industriel de l'École des Mines d'Albi-Carmaux et de la société IXAIRCO sur le projet HELIMaintenance R&D. Il traite de l'analyse des connaissances mises en œuvre dans l'aide à la décision en maintenance d'hélicoptère. Cette problématique complexe peut être abordée par plusieurs axes de recherche s'articulant autour de la gestion des connaissances, du processus de retour d'expérience, des techniques de satisfaction de contraintes et de manières de coupler ces approches.

En ce qui concerne la réalisation, nous avons sensibilisé les industriels aux approches que nous souhaitons développer pour faciliter les échanges et pour leur permettre d'exprimer leurs besoins. Par la suite, nous avons entrepris un travail de compréhension et de modélisation du processus de maintenance des hélicoptères pour identifier des cas typiques de maintenance que nous pourrions instrumenter avec des outils d'aide à la décision.

De plus, le projet de recherche HELIMaintenance R&D, et notamment le lot n°6 de ce projet, offre des perspectives académiques très intéressantes pour l'avenir, si toutefois le support industriel du projet, incarné par la société IXAIRCO, parvient à lancer réellement son activité malgré la crise économique en cours. En effet, l'axe de recherche qui me semble le plus prometteur réside dans le couplage entre les techniques de satisfaction de contraintes et le processus de retour d'expérience car ce domaine, encore peu exploré, paraît offrir un panel de possibilités très varié.

D'un point de vue personnel, ce stage m'a permis de découvrir les spécificités d'un travail de recherche qui m'a offert la possibilité d'utiliser et d'approfondir les connaissances acquises durant ma formation. De plus, le domaine de la maintenance des hélicoptères que j'ai exploré au travers de ce projet, m'a permis de rester en contact avec l'industrie aéronautique qui m'intéresse beaucoup. Ce stage est donc, pour moi, entièrement positif et m'a poussé à poursuivre mes études dans la recherche par un doctorat toujours dans le domaine aéronautique.

## TABLE DES ILLUSTRATIONS.

Figure I: Le Puma et le Dauphin.	8
Figure II: Diagramme GANTT représentant le planning prévisionnel du projet.	12
Figure III: Problématique de la capitalisation des connaissances d'après [Grundstein, 2002].	14
Figure IV : Distinction Données / Informations / Connaissances / Savoir-faire.	14
Figure V: Positionnement de l'expérience par rapport aux autres notions.	15
Figure VI : Dynamique des connaissances d'après [Baumard, 1996].	16
Figure VII : Le cycle du RàPC inspiré de [Aamodt et Plaza, 1994]	20
Figure VIII : Exemple simple de CSP	23
Figure IX : Classification des variables selon [Vareilles, 2005]	24
Figure X : Exemple de contrainte extensive représentée à l'aide d'une table de compatibilité	25
Figure XI: Illustration de l'arc-cohérence et de la chemin-cohérence	28
Figure XII : Table de compatibilité représentant une contrainte extensive entre variables discrètes.	35
Figure XIII : Modèle à base de contraintes utilisant des variables discrètes.	35
Figure XIV : Modèle à base de contraintes couplant variables discrètes et numériques.	36
Figure XV : Page d'indexation d'un cas dans le logiciel T-REX version HELIMaintenance.	38
Figure XVI : Illustration du couplage en parallèle et en série.	38
Figure XVII : Les différents symboles du formalisme ARIS.	40
Figure XVIII : Déroulement d'une visite de maintenance.	45
Figure XIX : Les méthodes de résolution de problème.	48
Figure XX : Structure globale des outils d'aide à la décision envisageables.	49

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

- [Aamodt, 1991] Aamodt, A., *A Knowledge-Intensive, Integrated Approach to Problem Solving and Sustained Learning*, Thèse de Doctorat: University of Trondheim, Norvège, 1991.
- [Aamodt et Plaza, 1994] Aamodt, A. et Plaza, E., Case-based reasoning : foundational issues, methodological variations, and system approaches, *Artificial Intelligence Communications*, IOS Press, vol. 7:1, pages 39-59, 1994.
- [Aha et Breslow, 1997] Aha, D. et Breslow L., Refining conversational case libraries, *Case-Based Reasoning Research and Development (Proc. ICCBR-97)*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer Verlag, 1997.
- [Avesani et al., 1993] Avesani, P., Perini, A. et Ricci, F., Combining CBR and Constraint Reasoning in Planning Forest Fire Fighting, *Proceedings of the 1st European Workshop on Case-Based Reasoning*, 1993.
- [Baumard,1996] Baumard P., *Les Organisations Déconcertées – La Gestion Stratégique de la Connaissance*, Editions Masson, 1996.
- [Béler, 2008] Béler, C., *Modélisation générique d'un retour d'expérience cognitif*, Thèse de Doctorat : Systèmes Industriels : Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2008.
- [Benhamou et al., 1994] Benhamou, F., Mc Allester, D. et Van Hentenryck, P., Clp (intervals) revisited, *Proceedings of the 1994 International Symposium on Logic Programming (ILPS'94)*, pages 1-21, 1994.
- [Bergmann, 2002] Bergman, R., *Experience Management*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002.

- [Berlandier, 1995] Berlandier, P., Improving Domain Filtering using Restricted Path Consistency, *Conference on Artificial Intelligence for Applications*, pages 32-37, 1995.
- [Bickford, 2000] Bickford, J., Sharing lessons learned in the Department of Energy, *Intelligent Lessons Learned Systems Workshop (AAAI-00)*, 2000.
- [Bilgic et Fox, 1996] Bilgic, T. et Fox, M., Constraint-Based Retrieval of Engineering Design Cases: Context as Constraints, *Artificial Intelligence in Design '96*, Kluwer Academic Publishers, pages 269-288, 1996.
- [Bitner et Reingold, 1975] Bitner, J. R. et Reingold, E. M., Backtracking programming techniques, *Communication of the ACM*, pages 651-656, 1975.
- [Brachman et Levesque, 1985] Brachman, R.J. et Levesque, H.J., *Readings in Knowledge Representation*, Morgan Kaufmann, 1985.
- [Carré, 1989] Carré, B., *Méthodologie orientée objet pour la représentation des connaissances, Concepts de point de vue, de représentation multiple et évolutive d'objets*, Thèse de Doctorat : Informatique : Lille, France, 1989.
- [Champin et al., 2004] Champin P.A., Laflaquiere, J., Mille, A. et Prie, Y., MUsETTE : a framework for Knowledge Capture from Experience, *12<sup>ème</sup> Atelier de Raisonement à Partir de Cas*, 2004.
- [Clermont et al., 2007] Clermont Ph., Béler C., Rakoto H., Desforges X. et Geneste L., Capitalisation et exploitation du retour d'expérience : un raisonnement à partir de cas étendu aux systèmes sociotechniques, *Raisonnement a partir de cas, conception et configuration de produits vol.1*, Série Informatique et Systèmes d'Information, collection Hermès, pages 249-277, 2007.
- [CraneField et Purvis, 1999] CraneField, S. et Purvis, M., UML as an ontology modeling language, *Proc. of the IJCAI-99 Workshop on Intelligent Information Integration*, 1999.
- [Cuneo, 2003] Cuneo A., *Le maître de Garamond*, Stock, 2003.
- [Debruyne et Bessière, 1997] Debruyne, R. et Bessière, C., From restricted path consistency to max restricted path consistency, *Third International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, pages 312-326, 1997.
- [Dechter, 1990] Dechter, R., Enhancement schemes for constraint processing : Backjumping, learning and cutset decomposition, *Artificial Intelligence*, pages 273-312, 1990.
- [Dechter, 2003] Dechter, R., *Constraint processing*, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 2003. ISBN 1-55860-890-7
- [Delahaye, 1996] Delahaye, P., *REX-FIAB : un système de retour d'expérience sur la fiabilité d'équipement*, 10<sup>ème</sup> Colloque National de Fiabilité et Maintenabilité, 1996.
- [Duizabo et Guillaume, 1996] Duizabo, S. et Guillaume, N., Les enjeux du transfert des connaissances, *Cahiers du GRES (9601)*, Université Paris Dauphine, 1996.
- [Ermine et al., 1996] Ermine, J.-L., Chaillot, M., Bignon, P., Charretton, B. et Malavieille, D., MKSM: Méthode pour la gestion des connaissances, *Ingénierie des systèmes d'Information, AFCET-Hermès vol. 4*, pages 540-575, 1996.

- [Fargier et Henocque, 2002] Fargier, H. et Henocque, L., *Configuration à base de contraintes*, Rapport Technique 0010.2002, Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS), UMR CNRS 6168, 2002.
- [Freuder, 1982] Freuder, E., A sufficient condition for backtrack-free search, *Journal of the ACM*, pages 24-32, 1982.
- [Freuder et Elfe, 1996] Freuder, E. et Elfe, C., Neighbourhood Inverse Consistency Preprocessing, *Proceedings of the 13th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-96)*, pages 202–208. ISBN 0-262-51091-X, 1996.
- [Gaillard, 2005] Gaillard, I., Etat des connaissances sur le retour d'expérience industriel et ses facteurs socioculturels de réussite ou d'échec, *cahier de l'ICSI vol. 2005-02*, 2005.
- [Gaschnig, 1979] Gaschnig, J., *Performance measurement and analysis of search algorithms*, Rapport Technique CMU-CS-79-124, Carnegie Mellon University, 1979.
- [Gelle, 1998] Gelle, E., On the generation of locally consistent solution spaces in mixed dynamic constraint problems, Thèse de Doctorat : Informatique : École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 1998.
- [Geller et Veksler, 2005] Geller, F. et Veksler, M., Assumption-Based Pruning in Conditional CSP, *Proceedings of the Eleventh International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, pages 241–255, 2005.
- [Golomb et Baumert, 1965] Golomb, S. W. et Baumert, L. D., Backtrack Programming, *Journal of the ACM*, pages 516–524, 1965.
- [Grelot et Guillaume, 2004] Grelot, F. et Guillaume, B., Retour d'expérience, une façon d'écrire l'histoire?, *Les inondations du Gard de septembre 2002 ou l'expertise scientifique collective au service d'un retour d'expérience*, 2004.
- [Grundstein, 2002] Grundstein, M., *De la capitalisation des connaissances au renforcement des compétences dans l'entreprise étendue*, Conférence invitée, 1<sup>er</sup> colloque du groupe de travail « Gestion des Compétences et des Connaissances en Génie Industriel », 2002.
- [Hayes, 1977] Hayes, P.J., Defence of logic, *IJCAI-77*, pages 559-565, 1977.
- [Hinrichs, 1992] Hinrichs, T.R., *Problem Solving in Open Worlds*, Lawrence Erlbaum Associates, 1992.
- [Hua et al., 1996] Hua, K., Faltings, B. et Smith, I., CADRE : case-based geometric design, *Artificial Intelligence in Engineering*, vol. 10, pages 171-183, Elsevier, 1996.
- [Huang et Miles, 1993] Huang, Y. et Miles, R., Using Case-Based Techniques to Enhance Constraint Satisfaction Problem Solving, *Applied Artificial Intelligence*, pages 307-328, 1996.
- [Knublauch, 2002] Knublauch, H., *An Agile Development Methodology for Knowledge-Based Systems Including a Java framework for Knowledge Modelling and Appropriate Tool Support*, Dissertationsschrift (Thèse de doctorat), University of Ulm, 2002.
- [Kolodner, 1993] Kolodner, J. L., *Case-Based Reasoning*, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1993. ISBN 1-55860-237-2
- [Lebowitz, 1999] Lebowitz, J., *Knowledge Management Handbook*, CRC Press, 1999.

- [Lenz et al., 1998] Lenz, M., Hübner, A. et Kunze M., Textual CBR, *Case-Based Reasoning Technology – From Foundations to Applications*, Springer, 1998.
- [Lhomme, 1993] Lhomme, O., Consistency techniques for numeric CSP, *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 232-238, 1993.
- [Lottaz, 1996] Lottaz, C. Constraint solving, preference activation and solution adaptation in IDIOM, *Technical report*, Artificial Intelligence Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology, 1996.
- [Maher et Zhang, 1991] Maher, M. et Zhang, D., CADSYN: Case and Decomposition Knowledge for Design Synthesis, *Artificial Intelligence in Design*, 1991.
- [Maher et Zhang, 1993] Maher, M. et Zhang, D., CADSYN: A Case-Based Design Process Model, *Artificial Intelligence in Engineering, Design, and Manufacturing*, 1993.
- [Marling et al., 2002] Marling, C., Squalli, M., Rissland, E., Munoz-Avila, H. et Aha, D., Case Based Reasoning Integrations, *AI Magazine vol.23*, pages 69-86, 2002.
- [MIAT, 2006] Ministère de l'Intérieur et de l'Aménagement du Territoire (MIAT), *Guide méthodologique : La conduite du retour d'expérience, éléments techniques et opérationnels*, Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles(DDSC), Sous Direction de la Gestion des Risques (SDGR), Bureau de l'Analyse et de la Préparation aux Crises (BAPC), 2006.
- [Minsky, 1975] Minsky, M., A framework for representing knowledge, P. Winston (editor), *The Psychology of Computer Vision*, pages 211-277, 1975.
- [Mittal et Falkenhainer, 1990] Mittal, S. et Falkenhainer, B., Dynamic Constraint Satisfaction Problems, *Proc. of the 8th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-90)*, pages 25–32, 1990.
- [Moore, 1966] Moore, R., *Interval Analysis*, Prentice-Hall, 1966.
- [Moore, 1982] Moore, R., The role of logic in knowledge representation and common sense reasoning, *AAAI-82*, pages 428-433, 1982.
- [Nebel, 1990] Nebel, B., Reasoning and Revision in Hybrid Representation Systems, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer-Verlag, 1990.
- [Nonaka, 1969] Nonaka I., A Dynamic Theory of Organisational Knowledge Creation, *Organization Science vol. 5(1)*, 1969.
- [Prax, 1997] Prax J.Y., *Le guide du knowledge management, Concepts et pratiques du management de la connaissance*, Ed. Dunod, 1997
- [Prosser, 1993] Prosser, P., Hybrid algorithms for constraint satisfaction problems, *Computational Intelligence*, pages 268-299, 1993.
- [Purvis et Pu, 1995] Purvis, L. et Pu, P., Adaptation using constraint satisfaction techniques, *First International Conference on Case Based Reasoning, Topics in Case Based Reasoning*, LNAI Series, Springer Verlag, 1995.
- [Purvis et Pu, 1996] Purvis, L. et Pu, P., An approach to case combination, *Workshop on adaptation in case-based reasoning (ECAI 96)*, 1996.



- [Quillian, 1966] Quillian, M.R., *Semantic Memory*, Thèse de Doctorat : Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, États-Unis, BBN Report AFCRL-66-189, 1966.
- [Rakoto, 2004] Rakoto, H., *Intégration du Retour d'Expérience dans les processus industriels : Application à Alstom Transport*, Thèse de Doctorat : Systèmes Industriels : Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [Rakoto et al., 2002] Rakoto H., Hermosillo Worley J. et Ruet M., Integration of experience based decision support in industrial processes, *International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (IEEE SMC 02), ISBN : 2-9512309-4-X, 2002.
- [REXAO, 2003] Groupement REXAO (Retour d'EXpérience et Apprentissage Organisationnel), <http://www.rexao.org>, 2003.
- [Ruet, 2002] Ruet, M., *Capitalisation et réutilisation d'expériences dans un contexte multiacteur*, Thèse de Doctorat : Systèmes Industriels : Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2002.
- [Sabin et Freuder, 1996] Sabin, D. et Freuder, E., Composite constraint satisfaction, *Artificial Intelligence and Manufacturing Research Planning Workshop*, pages 153–161, 1996.
- [Sabin et Freuder, 1998] Sabin, D. et Freuder, E., Detecting and resolving inconsistency and redundancy in conditional constraint satisfaction problems, *Proc. of the CP-98 Workshop on « Constraint Problem Reformulation »*, 1998.
- [Schreiber et al., 1994] Schreiber, A.T., Wielinga, B.J., De Hoog, R., Akkermans, H. et Van de Velde, W., CommonKADS : A Comprehensive Methodology for KBS Development, *IEEE Expert*, 1994.
- [Shimazu, 1998] Shimazu, H., A textual case-based reasoning system using XML on the world-wide web, *Advances in Case-Based Reasoning (EWCBR'98), Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI)*, Springer Verlag, 1998.
- [Smith and al., 1995] Smith, I., Lottaz, C. et Faltings, B., Spatial composition using cases: IDIOM, *First International Conference on Case Based Reasoning, Topics in Case Based Reasoning*, LNAI Series, Springer Verlag, pages 88-97, 1995.
- [Smith and al., 1996] Smith, I., Stalker, R. et Lottaz, C., Creating design objects from cases for interactive spatial composition, *In Artificial Intelligence in Design '96*, pages 97-116, 1996.
- [Sowa, 1984] Sowa, J.F., *Conceptual Structures : Information Processing in Mind and Machine*, Addison-Wesley Publishing Company, 1984.
- [Squalli et al., 1999] Squalli, M., Purvis, L. et Freuder, E., Survey of applications integrating constraint satisfaction and case-based reasoning, *First International Conference and Exhibition on The Practical Application of Constraint Technologies and Logic Programming (PACLP99)*, 1999.
- [Squalli et Freuder, 1998] Squalli, M. et Freuder, E., Diagnosing InterOperability Problems by Enhancing Constraint Satisfaction with Case-Based Reasoning, *Working Papers of the Ninth International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-98)*, pages 266-273, 1998.
- [Stumptner et Haselböck, 1993] Stumptner, M. et Haselböck, A., A generative constraint formalism for configuration problems, *Advances in Artificial Intelligence : proceedings of the Third Congress of the Italian Association for Artificial Intelligence (AI\*IA '93)*, pages 302–313, 1993.

- [Sun et Finnie, 2004] Sun Z. et Finnie G., Brain-like architecture and experience-based reasoning, *Proc. 7th Joint Conf on Information Sciences (JCIS)*, pages 1735-1738, 2004.
- [Tsang, 1993] Tsang, E., *Foundation of Constraint Satisfaction*, Academic Press, 1993.
- [Van Oudenhove, 2006] Van Oudenhove, T., *Contribution à l'élaboration d'un formalisme gérant la pertinence pour les problèmes d'aide à la conception à base de contraintes*, Thèse de Doctorat : Systèmes Industriels : Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2006.
- [Van Oudenhove et al., 2006] Van Oudenhove, T., Gaborit, P., Aldanondo, M. et Vareilles, E., CSP dynamiques en configuration, *Actes des deuxièmes Journées Francophones de Programmation par Contraintes (JFPC-06)*, pages 397-404, 2006.
- [Vareilles, 2005] Vareilles, E., *Conception et approches par propagation de contraintes : contribution à la mise en œuvre d'un outil d'aide interactif*, Thèse de Doctorat : Systèmes Industriels : Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [Verfaillie et Jussien, 2005] Verfaillie, G. et Jussien, N., Constraint Solving in Uncertain and Dynamic Environments : A Survey. *Constraints*, pages 253–281, 2005.
- [Vernat, 2004] Vernat, Y., *Formalisation et qualification de modèles par contraintes en conception préliminaire*, Thèse de Doctorat : Mécanique : École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, France, 2004.
- [Véron et Aldanondo, 2000] Véron, M. et Aldanondo, M., Yet Another Approach to CCSP for configuration problem, *European Conference on Artificial Intelligence (ECAI'00), Workshop on Configuration*, pages 59–62, 2000.
- [Vérot, 2001] Vérot, Y., Retour d'expérience dans les industries de procédé, *Techniques de l'Ingénieur*, AG 4 610, juillet 2001.
- [Wang, 2006] Wang P., *Rigid Flexibility, The Logic of Intelligence*, Springer Netherlands, ISBN : 978-1-4020-5044-2 (Print) 978-1-4020-5045-9, 2006.
- [Yokoyama, 1990] Yokoyama, T., An object-oriented and constraint-based knowledge representation system for design object modelling, *Proceedings of the Sixth Conference on Artificial Intelligence Applications*, pages 146-150, 1990.

## **ANNEXES.**



## ANNEXE 2 : Le formalisme de modélisation BPMN.

Le contenu de cette annexe est une synthèse traduite du site [www.diveintobpm.org](http://www.diveintobpm.org) qui présente le formalisme de modélisation BPMN de manière très ludique à l'aide d'animations et de schémas. Pour un complément d'informations, veuillez vous rapporter à ce site.

Le formalisme BPMN (Business Process Modelling Notation) est développé par la BPMP (Business Process Management Initiative) depuis 2005. Il a été conçu pour être facilement utilisable et compréhensible par tous les acteurs de l'entreprise.

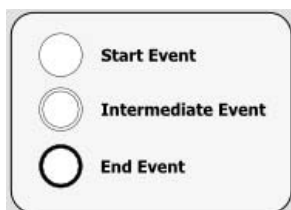
Il s'organise autour de six types de sigles différents symbolisant les événements, les activités, les jonctions, les connexions et les « bassins » :

### 1. Les événements.

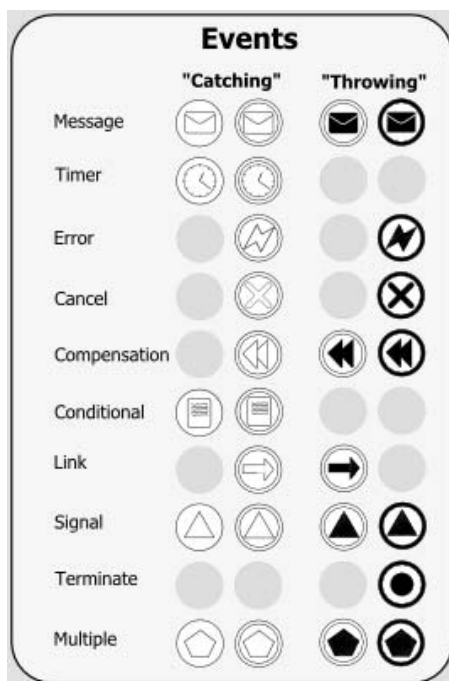
Il existe trois types d'événements qui peuvent affecter le déroulement du processus modélisé :

- ° Les événements de départ (Start Events) qui déclenchent un processus ou un sous-processus.
- ° Les événements intermédiaires (Intermediate Events) qui indiquent la présence d'événements notables durant le processus.
- ° Les événements de fin (End Event) qui terminent un processus ou un sous processus.

Voici leur modélisation :

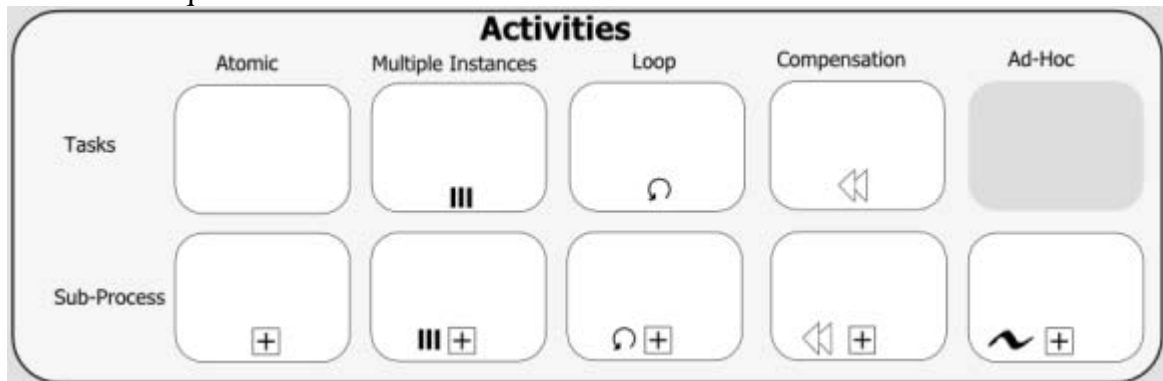


Il existe plusieurs catégories d'événements permettant de définir la nature d'un événement :



## 2. Les activités.

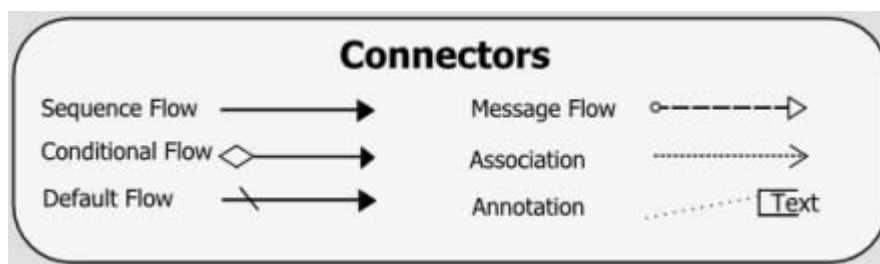
On distingue deux types d'activités différentes : les tâches ou les sous-processus. Les activités (« Activities ») symbolisent la réalisation d'une action voir plusieurs dans le cas des sous-processus. Ces activités peuvent être marquées pour caractériser leurs natures. Voici les différentes marques :



- L'option « Multiple Instances » signifie que l'activité peut être exécutée plusieurs fois en parallèle.
- L'option « Loop » signifie que l'activité peut être exécutée plusieurs fois à la suite.
- L'option « Compensation » indique que l'activité est une forme de compensation (généralement financière).
- L'option « Ad-Hoc » signifie que le sous-processus est composé de tâches non structurées.

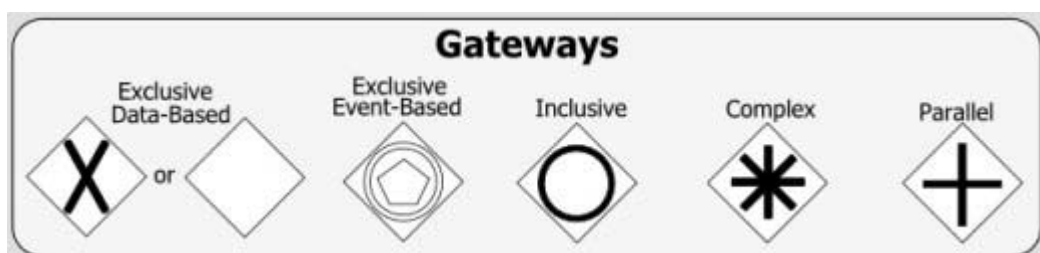
## 3. Les connexions.

Il existe plusieurs types de connexions entre les différents éléments. Le choix dépend de ce que la connexion symbolise à savoir le flux du processus avec ou sans condition, un message ou un commentaire de l'utilisateur. Voici les différentes possibilités :



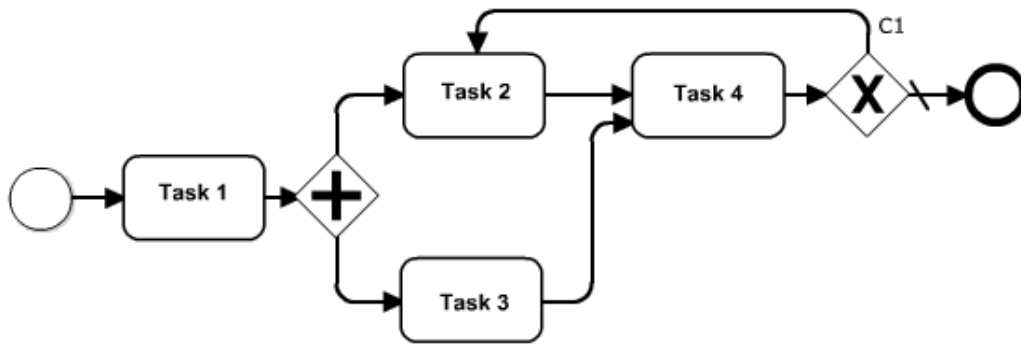
## 4. Les jonctions.

Les jonctions (« Gateways ») symbolisent les points de décision utilisés pour diriger le déroulement du processus en l'orientant, le divisant ou en réunissant plusieurs flux. Voici les différentes jonctions possibles :



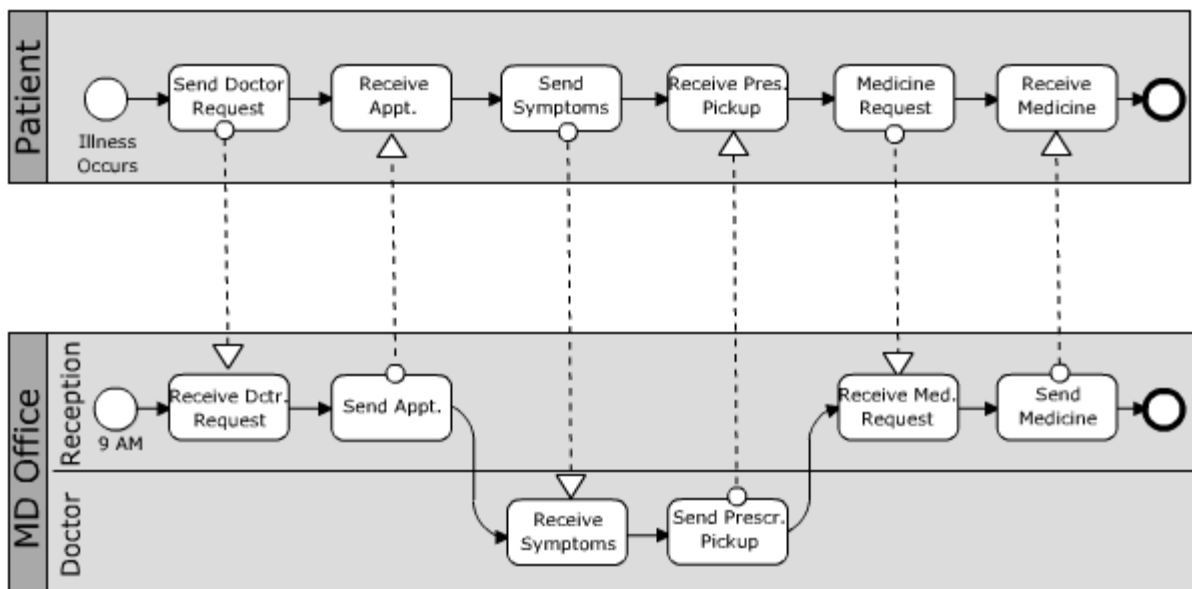
- Les options « Exclusive Data-Based » et « Exclusive Event-Based » correspondent à des portes logiques « OU Exclusif » où le choix entre les différents chemins possibles se fait grâce à une donnée ou un événement.
- L'option « Inclusive » correspond à la porte logique OU.
- L'option « Complex » indique que cette jonction est paramétrable selon les besoins de l'utilisateur.
- L'option « Parallel » correspond à la porte logique ET.

Voici un exemple simple de processus utilisant différentes jonctions:

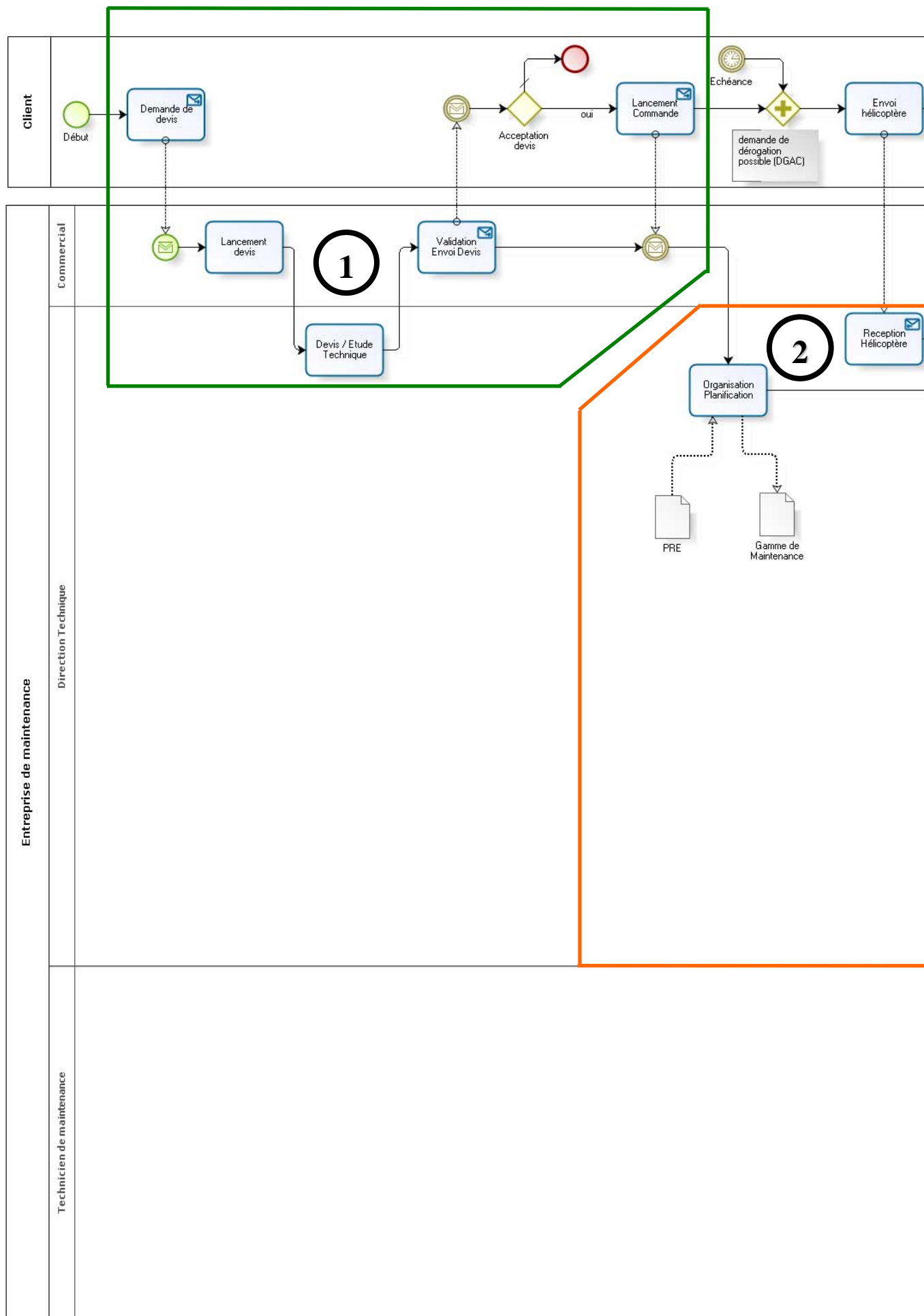


## 5. Les bassins.

La notion de bassin (« Pool ») est utilisée pour définir l'entité qui réalise le processus modélisé à l'intérieur du bassin. Ces bassins peuvent être divisés en « ligne d'eau » (« swimlane ») pour signifier l'acteur exact qui réalise la tâche. On obtient ainsi deux niveaux de représentation des responsabilités. Par exemple, chaque bassin correspond à un service de l'entreprise et les lignes d'eau aux différents employés de chaque service. Voici un exemple succinct montrant le processus d'une visite chez le médecin :

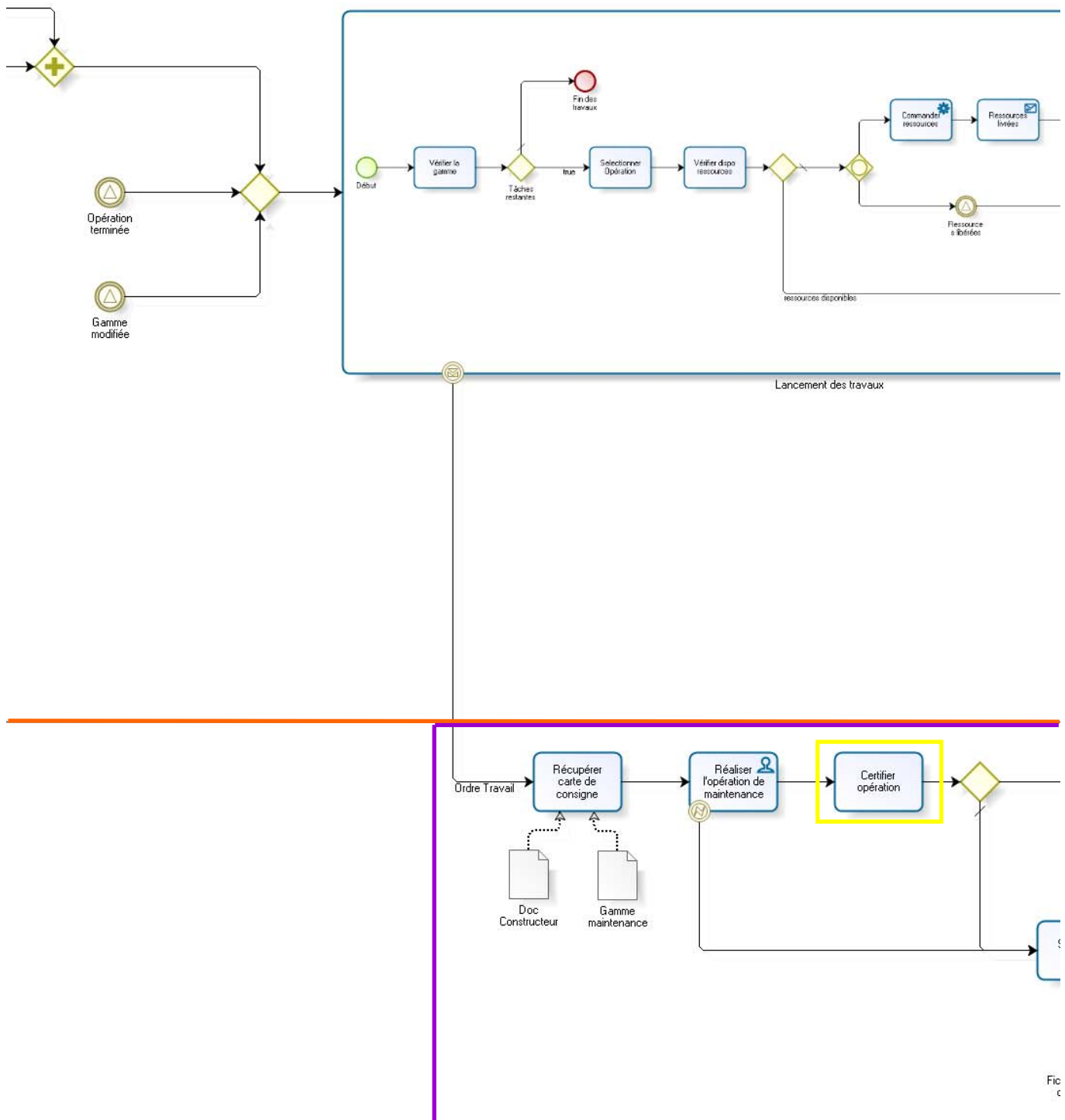


On distingue ici deux bassins (« Patient » et « MD Office ») et le bassin « MD Office » est composé de deux lignes d'eau (« Reception » et « Doctor »).

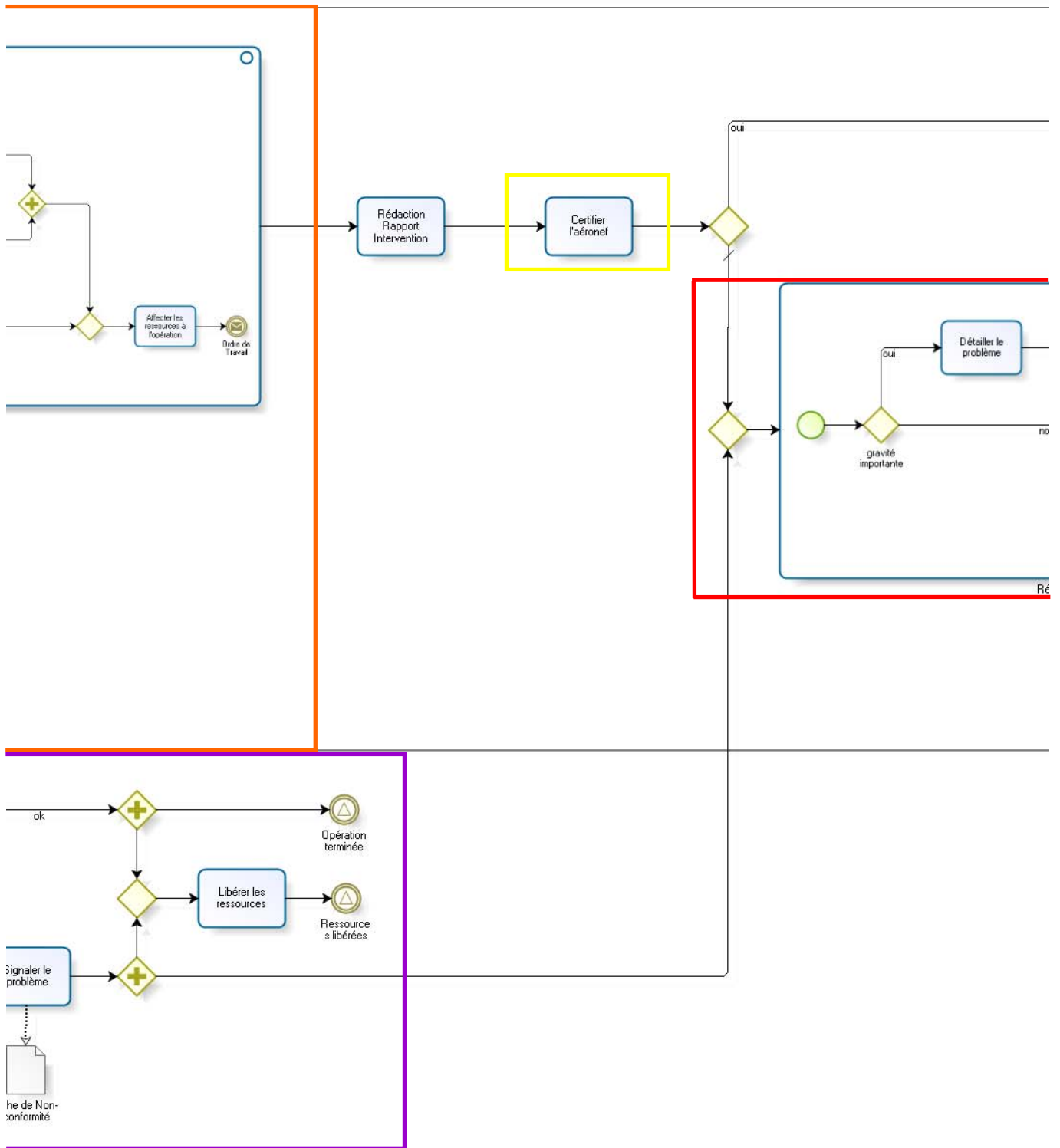


ANNEXE 3 : Le processus de maintenance des hélicoptères.

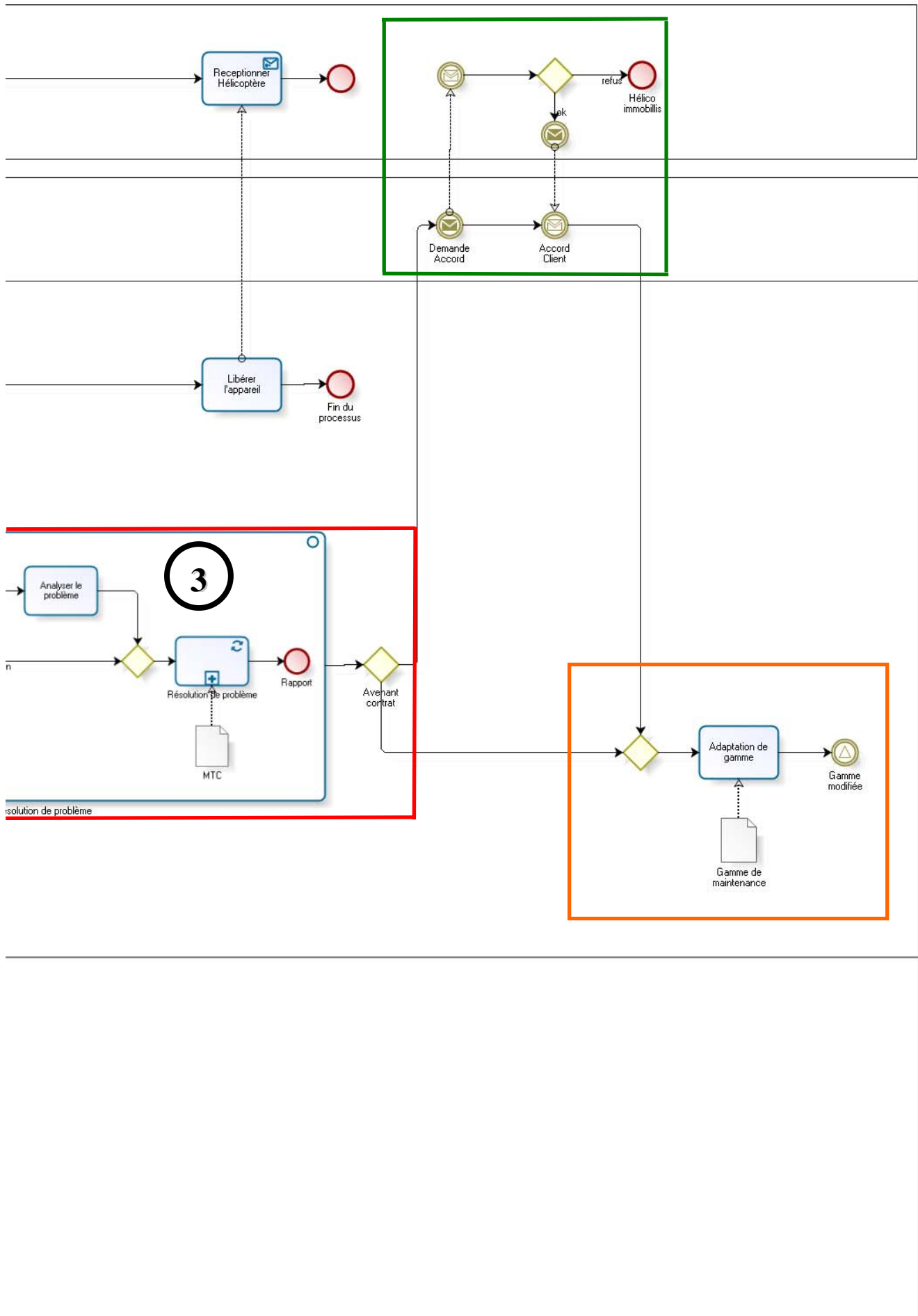




ANNEXE 3 : Le processus de maintenance des hélicoptères.



**ANNEXE 3 : Le processus de maintenance des hélicoptères.**



## ANNEXE 4

# Page d'indexation des cas T-REX Version HELIMaintenance

<b>Le problème</b>	Service : <input type="text" value="1"/>	Domaine : <input type="text" value="2"/>
Description : <div><div>3</div></div>		Classification : Majeure <input type="checkbox"/> Mineure <input type="checkbox"/> 4
		Date de détection : <input type="text" value="5"/>
		Référence : <input type="text" value="6"/>
		Nom de l'auteur : <input type="text" value="7"/>

<b>L'aéronef concerné :</b>	<b>Nature des travaux en cours :</b>
Désignation : <input type="text" value="8"/>	Visite : <input type="text" value="14"/>
Type : <input type="text" value="9"/>	Vidange : <input type="text" value="15"/>
Immatriculation : <input type="text" value="10"/>	Travaux supplémentaires prévus : <div><div>16</div></div>
N° de série : <input type="text" value="11"/>	
Heures de vol : <input type="text" value="12"/>	
Nombre d'atterrissage : <input type="text" value="13"/>	

<b>La pièce concernée :</b>	
Sous-ensemble : <input type="text" value="17"/>	Désignation : <input type="text" value="18"/>
Référence : <input type="text" value="19"/>	N° de série : <input type="text" value="20"/>

<b>Le propriétaire :</b>	
Nom : <input type="text" value="21"/>	N° de commande : <input type="text" value="22"/>
Adresse : <div><div>23</div></div>	N° de téléphone : <input type="text" value="24"/>
	E-mail : <input type="text" value="25"/>

## ANNEXE 4

### **Notice explicative de modification de la page d'indexation des cas du logiciel T-REX Version HELIMaintenance.**

Cette notice sert à expliquer les contraintes présentées par le modèle de page d'indexation des cas ci-dessus. La mise en forme est juste indicative, elle peut être modifiée à la convenance du développeur.

#### Liste des abréviations utilisées dans ce document:

MD: Menu déroulant

ZT: Zone de texte

BR: Bouton radio

#### Descriptif des différents objets du formulaire:

1 : MD proposant "Atelier Équipement", "Atelier Mécanique" et "Atelier Radio".

2 : MD proposant "Part 145", "Part 21", "CTA/Nav" et "Autres".

4 : BR avec le choix entre Majeure et Mineure.

5 : ZT vide avec accès à un calendrier.

8 : MD proposant "PUMA" et "DAUPHIN".

9 : MD proposant selon le choix du MD précédent "B", "BA" et "F" (PUMA) et "N", "N1" et "N2" (DAUPHIN).

14 : MD proposant "50H / 4 mois", "100H / 1 an" et "2200H / 12 ans".

15 : MD proposant "BTP", "BTA", "Hydraulique" et "GTM".

17 : MD proposant "Sous-ensemble 1" et "Sous-ensemble 2".

18 : MD proposant selon le choix du MD précédent "Pièce 1.1", "Pièce 1.2" et "Pièce 1.3" (Sous-ensemble 1) et "Pièce 2.1", "Pièce 2.2" et "Pièce 2.3" (Sous-ensemble 2).

3, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 : ZT vides.